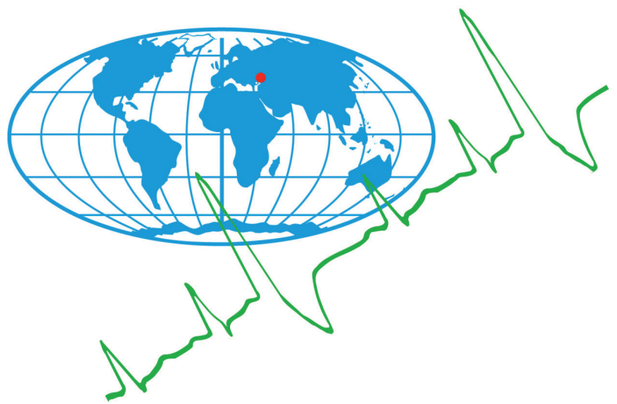
ISSN 2220-5861

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ИНСТИТУТ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 1 (47)



Севастополь

2022

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ № 1 (47) 2022

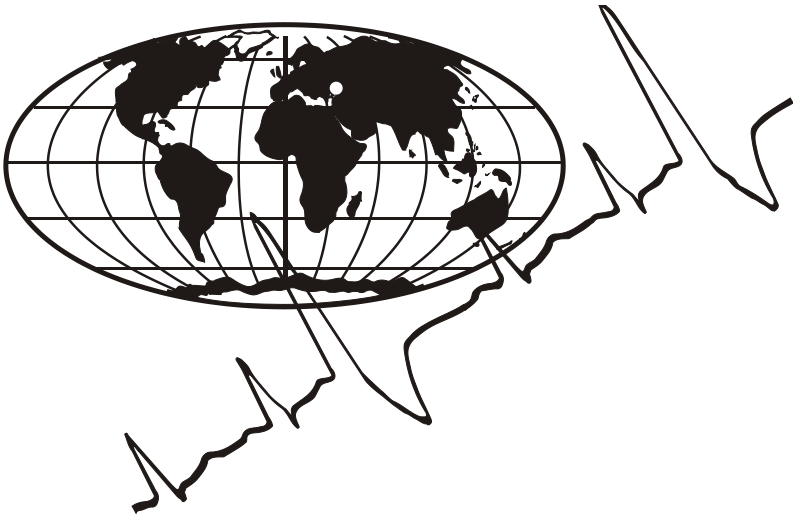
ISSN 2220-5861

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ИНСТИТУТ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 1 (47)



Севастополь

2022

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 1 (47) 2022

Журнал научно-технический основан в 1998 г.
Языки: русский, английский
Периодичность: 4 раза в год
ISSN 2220-5861

В журнале публикуются результаты работ по созданию и использованию систем мониторинга окружающей среды, включая методы и средства контроля природной среды, климата и техногенных объектов, систем экологического мониторинга, их алгоритмического, программного, метрологического и информационного обеспечения.

Главный редактор Полонский А.Б., д.г.н., чл.-корр. РАН

Редакционная коллегия:

Белан Б.Д., д.ф.-м.н., Воскресенская Е.Н., д.г.н.,
Гайский В.А., д.т.н. (зам. гл. редактора), Гимпилевич Ю.Б., д.т.н.,
Греков Н.А., д.т.н., Дрюккер В.В., д.б.н., Евстигнеев М.П., д.ф.-м.н.,
Егоров В.Н., д.б.н., Кебкал К.Г., д.т.н., Копп В.Я., д.т.н.,
Краснодубец Л.А., д.т.н., Левашов Д.Е., д.т.н.,
Нестеров Е.С., д.г.н., Римский-Корсаков Н.А., д.т.н.,
Романовская А.А., д.б.н., Рыбак О.О., д.ф.-м.н., Скатков А.В., д.т.н.,
Цао Сюань (Cao Xuan), д.н., Мин Лю (Ming Liu), д.н.,
Сон Джун (Song Jun), д.н.,

Учредитель: Институт природно-технических систем (ИПТС)

Издатель: Институт природно-технических систем (ИПТС)

Почтовый адрес: 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-63023 от 10 сентября 2015 г.
Журнал размещен в каталоге научной периодики РИНЦ на платформе научной электронной информации eLibrary.ru.
Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 26.03.2019 г. по научной специальности: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки).
В журнале публикуются материалы, прошедшие внешнее рецензирование.
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,298. Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,370.

© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт природно-технических систем» (ИПТС), 2022

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Научные основы методов контроля природной среды и климата

SUN Jiyu, ZHU Zemin, SONG Jun, GUO Junru, CAI Yu, FU Yanzhao, Wang Linhui, Polonsky A. Research on multivariate Yellow Sea SST week prediction method based on encoder-decoder LSTM 5

А.Б. Федотов. Анализ временных масштабов долгопериодной изменчивости океанической циркуляции с использованием трехслойной численной модели 15

Методы контроля природной среды и техногенных объектов

О.А. Степанова, С.А. Шоларь. Оценка результатов мониторинга индикаторных альговирусов в период карантина по COVID-19 (2020–2021 гг.) 20

Л.И. Лукина, Д.В. Моисеев. Анализ радиоэкологических особенностей Чернобыльской аварии 28

А.С. Чернова, А.А. Исламутдинова, Э.К. Аминова, В.А. Идрисова. Ингибиторы кислотной коррозии на основе амидов олеиновой кислоты. . . . 43

Л.И. Осадчая, Л.А. Ничкова, А.Р. Герасимов, Д.С. Шенин. Исследование пароводяного шлейфа градирни в окружающей среде 49

Технические средства систем контроля природной среды

Л.А. Краснодубец. Динамические измерения в задачах оперативной океанологии при исследовании свойств океанской толщи 56

Системы экологического мониторинга

С.А. Гутник, Е.И. Азаренко, Г.А. Сигора, В.С. Гутник, Л.А. Ничкова, Т.Ю. Хоменко. Зонирование территории г. Севастополя для организации мониторинга загрязнения атмосферы 66

Н.А. Андреева. Мониторинг состава цианобактерий перифитона и эпилитона прибрежного мелководья (Чёрное море, Севастополь) 74

И.В. Овсянникова, В.В. Пряничникова, Р.Р. Кадыров, И.А. Кичигин, И.Р. Шугаепов, Б.А. Яппаров. Изучение токсических свойств нефтезагрязнённой почвы с использованием методов биотестирования 81

И.В. Агаркова-Лях. История изучения и организации наблюдений за экзогенными геологическими процессами на берегах Севастополя от м. Тюбек до м. Сарыч 86

В.Г. Щербина. Динамика аллелопатических эффектов почвы в лесных экосистемах с монодоминантным древостоем после моделирования рекреационной нагрузки 94

Метрологическое обеспечение систем контроля природной среды

М.В. Лапа, С.Е. Кравцова, В.А. Сафонов. Анализ состояния измерений, испытаний и контроля окружающей среды на производстве и в научных исследованиях 105

Алгоритмическое и программное обеспечение в системах контроля природной среды

А.Н. Греков, А.А. Кабанов. Ансамблевые методы машинного обучения для определения углов Эйлера в инерциальной навигационной системе 112

Ю.М. Поповнин, Д.М. Пузанов, В.Ф. Гришко. Статистическая модель адаптивной системы компенсации шумовых помех в радиолокаторе при обнаружении гидрометеорных образований в атмосфере 121

Алфавитный указатель авторов. 131

DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-5-14

RESEARCH ON MULTIVARIATE YELLOW SEA SST WEEK PREDICTION METHOD BASED ON ENCODER-DECODER LSTM

SUN Jiyu[1,2], ZHU Zemin[1,2], SONG Jun[1,2 *], GUO Junru[1,2], CAI Yu[1,2], FU Yanzhao[1,2], Wang Linhui[1,2], Polonsky A.[3]

[1]Dalian Ocean University, School of Ocean Technology and Environment, Dalian, Liaoning 116023
[2]Operational Oceanographic Institution, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023
[3]Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, 28 Lenin St. 299011
E-mails: 1347248624@qq.com *(*SUN Jiyu**);** apolonsky5@mail.ru (A. Polonsky)

In order to further improve the accuracy and stability of sea surface temperature forecasting, this paper uses the 25-year historical data of OISST V2.0 and OAFlux, and fully considers factors such as radiation flux, heat flux, wind speed, air temperature, air specific humidity and SST. By controlling the variables and selecting the best model parameters, a multivariate Yellow Sea SST weekly prediction model based on the Encoder-Decoder LSTM (Long Short Term Memory) was constructed for the first time. The model can effectively track the daily change trend of SST, and respond to its fluctuation changes to achieve relatively accurate prediction. Taking 2008 as an example, the daily absolute errors of the test set within a week are 0.3836, 0.4523, 0.5276, 0.5905, 0.6362, 0.6644, and 0.6827, and the overall RMSE is 0.7594. It is concluded that further research is needed on the optimization of predictors and the applicability of single-point forecasting using the discussed model.

Keywords: LSTM; SST; Yellow Sea; artificial intelligence method; SST forecast

Submitted: 27 January 2022 Accepted: 10 March 2022

Introduction. As the interface between the ocean and the atmosphere, the sea surface has many unique physical and chemical properties. Among them, Sea Surface Temperature (SST) is the comprehensive result of ocean thermal process, dynamic process and air-sea interaction. A more intuitive reference, it also provides a prerequisite for understanding, predicting weather and climate, and planning various offshore activities such as recreational activities and fishing. However, predictions of SST are highly uncertain due to large variations in heat flux, radiation, and diurnal winds near the sea surface [1].

SST analysis and forecasting began in the 1940s. With the continuous observation of multiple days and nights since 1950 and the continuous observation of marine weather ships since 1960, and the rise of satellite remote sensing, aerial remote sensing technology, and deep water exploration technology after 1970, research on seawater temperature analysis and forecasting methods in the open sea and ocean waters has developed rapidly [2]. At present, the widely used methods for SST forecasting include mathematical statistics and dynamic numerical methods. Mathematical statistics methods are mainly based

on probability statistics, without corresponding physical meanings, and forecasting methods are at the bottleneck stage. Because the dynamic numerical method cannot accurately know the eigenvalues of the marine dynamic and thermal conditions, some assumptions and simplifications have to be made in the application, which actually has a certain degree of experience. Although today's artificial intelligence prediction methods have no clear physical meaning, the neural network in artificial intelligence methods can determine the coupling weights between neurons through the self-learning function, so that the network as a whole has the function of approximate function, which is very modeling research suitable for nonlinear systems has become a new direction of research on SST forecasting methods. Long Short Term Memory (LSTM) is a special recurrent neural network that introduces the gate mechanism into ordinary Recurrent Neural Networks (RNN) to prevent the gradient problem. It has strong ability to simulate the time series relationship of time series data, and can better deal with long-term dependence problems [3]. It has a wide range of applications [4-10], but it is less used in SST prediction. In 2017, Zhang et al. first tried to use the recurrent neural network to solve the SST forecasting problem, and carried out daily forecasting for one week and one month, transforming the SST forecasting problem into a time series regression problem [3], but with the quite strong limitation concerning the relationship between different factors. Therefore, this paper fully considers factors such as radiation flux, heat flux, wind speed, temperature, air specific humidity, etc., explores the complex relationship between various factors and SST, and establishes a multivariate Yellow Sea SST weekly prediction model based on Encoder-Decoder LSTM.

Studied area and data processing. It is well-known, the sea water temperature is relatively stable in the open basin, while it is much more variable in the coastal zone (e.g., [11]). The Yellow Sea is a semi-enclosed marginal sea surrounded by China and the Korean Peninsula. In the sea area, there are many ocean currents such as the Yellow Sea Warm Current and the Yellow Sea Coastal Current, and the water temperature changes significantly. Therefore, this paper takes the Yellow Sea as the research area to explore the SST weekly prediction method.

The SST forecasting models designed in this paper are all single-point forecasting models that transform the SST forecasting problem into a time series regression problem. In order to show the typical SST characteristics of the Yellow Sea, four representative points are selected from the Yellow Sea. The longitude and latitude of the selected four points, namely P1, P2, P3, and P4 are 34.5°N, 121.5°E, 38.5°N, 122.5°E, 32.5°N, 123.5°E and 36.5°N, 124.5°E, respectively, as shown in Fig. 1. Among them, point P1 is close to the apex of the warm tongue of the Yellow Sea Warm Current, point P2 is located in the North Yellow Sea, point P3 is located below the warm tongue, and point P4 is located on the west coast of the Korean Peninsula. It can be seen that the distribution of the four points basically covers the Yellow Sea area, representing the typical Yellow Sea SST to a certain extent.

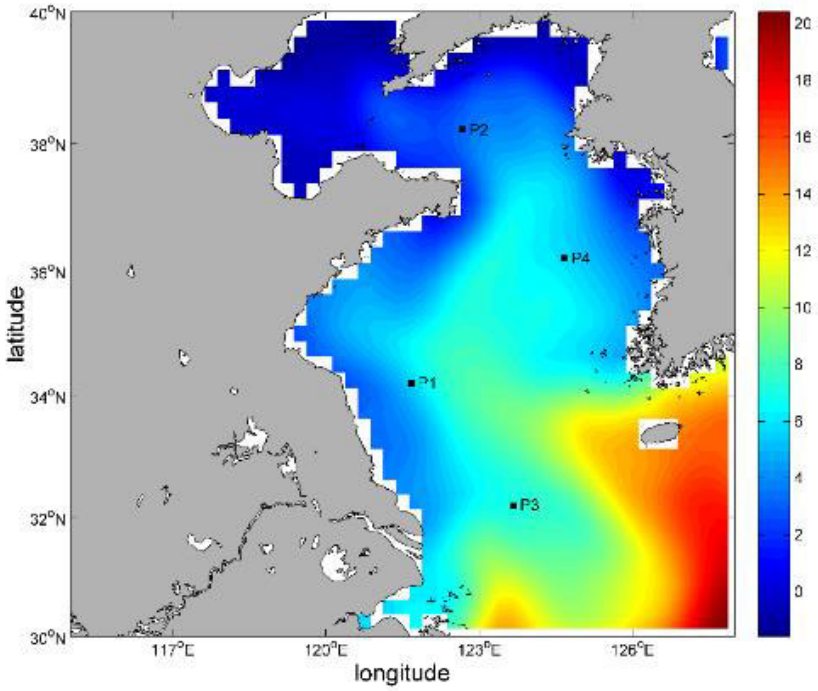


Fig. 1. Location of the selected four-points at the map of daily average sea surface temperature in mid-February of 2018

The LSTM model is trained and learned based on data, so it requires the high data quality. In this paper, OISST V2.0 of NOAA's official website is used as the daily SST data, and the space resolution is 0.25°*0.25°. The covered time period is 25 years (from 1985 to 2009). In addition, the SST change is mainly divided into two parts: gain and lost. The gained heat comes mainly from solar radiation (sw), while the lost heat is mainly transported to the atmosphere in the form of sensible heat exchange (sh), latent heat (lh) and long-wave radiation (lw). Therefore, this paper selects the daily average air-sea flux data of Objectively Analyzed air-sea Fluxes (OAFlux), and selects net heat flux (qnet=sw-lw-lh-sh), 2m air specific humidity according to the influencing factors of SST, 2m air temperature and 10m wind speed and other sea surface fluxes as the key parameters of the model.

The SST data and flux data were combined to predict the SST for the third week using the data from the first two weeks. In order to ensure that the model is fully trained, a sliding window is used for the merged data, the window width is set to 21 days, and the time step is set to 1 day. For example, the first window is to predict the sea surface temperature from January 15 to 21, 1985 using the sea surface temperature and flux data from January 1 to 14, 1985, and the next window is to use January 2, 1985. The sea surface temperature and flux data from January to 15th predict the sea surface temperature from January 16th to 22nd, 1985, and so on. Finally, 6370 sets of training set data were obtained, from January 1, 1985 to July 1, 2002, 1806 sets of validation set data, from July 2, 2002 to July 2, 2007, and 889 test set data. Group, the time is from July 3, 2007 to December 28, 2009, and the ratio of the three is 7:2:1. At the same time, in order to improve the convergence speed of the model, the data as a whole is normalized.

LSTM-based SST Week Prediction Model. Long Short-Term Memory. Long Short-Term Memory (LSTM) is a type of Recurrent Neural Network (RNN). In order to solve the problem of gradient explosion and gradient dispersion in Recurrent Neural Networks, it was proposed by Hochreiter and Schmidhuber in 1997 [12], and was recently carried out by Alex Graves improved and promoted (personal communication). Its neural unit (cell) structure is shown in Figure 2:

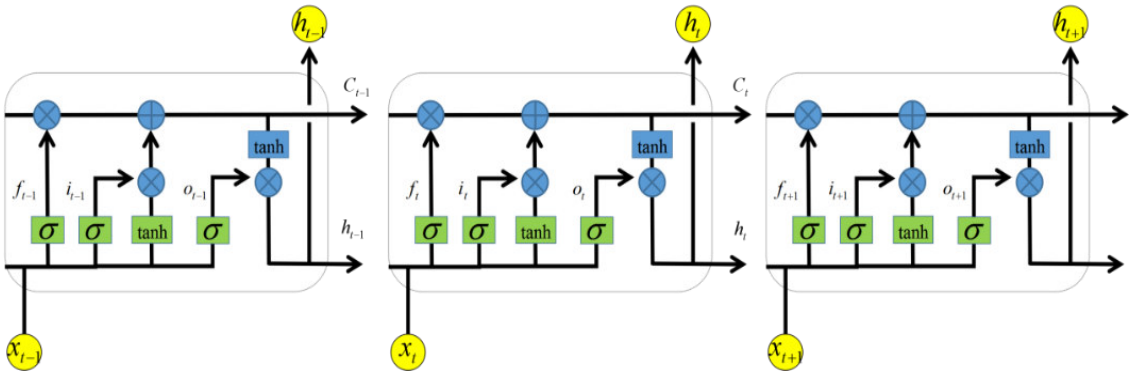


Fig. 2. Diagram of LSTM neural unit structure

The main difference between LSTM and RNN is that LSTM adds a processor to the algorithm to judge whether the information is useful, that is, the neural unit in Figure 2. An input gate (i_t), forget gate (f_t) and output gate (o_t) are placed in a neural unit. The input gate determines the new information stored in the cell, the forget gate determines the information discarded from the cell, and the output gate determines the information output from the cell. According to the input x_t of the current moment, the cell state C_(t-1) of the previous moment and the stored information h_(t-1) of the previous moment, each neural unit is processed by the forget gate, input gate and output gate to obtain the current moment. The cell state C_t and the stored information h_t at the current moment, the specific calculation process is shown in the following formulas:

$$f_t = \sigma\left(W_f x_t + V_f h_{t-1} + b_f\right) \quad (1)$$

$$i_t = \sigma(W_i x_t + V_i h_{t-1} + b_i) \quad (2)$$

$$\tilde{C}_t = tanh(W_C x_t + V_C h_{t-1} + b_C) \quad (3)$$

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t \quad (4)$$

$$o_t = \sigma(W_o x_t + V_o h_{t-1} + b_o) \quad (5)$$

$$h_t = o_t * tanh(C_t) \quad (6)$$

Among them, x_t represents the input of the vector at time t; C_t represents the cell state at time t; h_t represents the hidden state vector of all useful information stored at time t and previous moments; σ represents the sigmoid function; W_f, W_i, W_C, W_o represent the corresponding weight matrix; V_f, V_i, V_C, V_o represent the corresponding transition matrix; b_f, b_i, b_C, b_o represent the bias of the corresponding weight [9]; * represents the dot product.

Model Construction and Parameter Setting. The Encoder-Decoder model is mainly used to solve the seq2seq problem,

that is, according to an input sequence x, to generate another output sequence y. This paper uses the SST and flux data of the first two weeks to predict the SST of the third week. The input sequence dimension is 14*5, and the output sequence dimension is 7*1, which belongs to the seq2seq problem of unequal input and output sequence lengths. The Encoder-Decoder LSTM model in this paper is implemented based on the deep learning framework Keras, and uses the add function to linearly stack multiple network layers. The specific construction process is as follows:

(1) Encoder model settings: build 1 layer of LSTM layer, the input data dimension is 14*5, The activation function is relu.

(2) Decoder model settings: also build a 1-layer LSTM layer, the activation function is relu, and the "return_sequences" parameter is set to "True" to ensure output at every time step. At the same time, a fully connected layer with an activation function of relu is added to connect the hidden layer and the output layer.

(3) Connect the encoder and decoder models: the output of the encoder model is a two-dimensional matrix, and the input of the decoder model is a three-dimensional matrix (samples, time steps, features). To connect the two, create a RepeatVector layer to convert the output of the Encoder (the last time step) 7 copies are used as the input of the Decoder 7 times.

After the model structure is constructed, it is necessary to determine the hyperparameters. In this paper, 4 points P1, P2, P3, and P4 are randomly selected in the Yellow Sea, and the corresponding SST and flux data are extracted for training, and the root mean square error RMSE of the test set is used as the model. The performance evaluation indicators are compared. The loss function loss selects the mean square error (mse), the optimizer selects ADAM (Adaptive Moment Estimation), the batch size batch_size is set to 64, 96, 128, respectively, and 128 is selected after comparison. The selection method of the number of layer units units_fc is similar, and the number of training rounds epoch is set to 100.

In experiment 1, the number of units_fc of the fully connected layer is set to 100, and the number of units_r of the hidden layer is set to 10, 80, 100, 120, and 200, respectively. The model learning prediction results are shown in Table 1. The bold font in the table indicates the minimum RMSE when different units_r are selected at the same location, and the overall RMSE is the average RMSE predicted for 7 days. It can be seen from Table 1 that points P1 and P2 have the smallest RMSE for each day of the 7 days when units_r is set to 100 for weekly prediction, and the corresponding overall RMSE is also the smallest, which are 0.7556 and 0.7514, respectively. The overall RMSE of point P3 is the smallest when units_r is set to 120, which is 0.8039; the overall RMSE of point P4 is the smallest when units_r is set to 80, which is 0.8240. Average the overall RMSEs at 4 points for the same units_r, and the overall average RMSEs are 0.8230, 0.8169, 0.7930, 0.802825, and 0.8194, respectively. Based on the performance of 4 points, the model has the best performance when units_r is 100, the second is when units_r is 80 and 120, and the worst when units_r is 10 and 200, so in the next experiment, set the number of hidden layer units units_r to 100.

Table 1. Prediction results of 4 points at different units_r (RMSE)

units_r	Plot	RMSE	Day_1	Day_2	Day_3	Day_4	Day_5	Day_6	Day_7
10	P1	0.7833	0.5495	0.6512	0.7259	0.7895	0.8465	0.8990	0.9452
	P2	0.8047	0.5856	0.6720	0.7267	0.8093	0.8714	0.9241	0.9704
	P3	0.8763	0.6244	0.7468	0.8230	0.8847	0.9412	0.9937	1.0463
	P4	0.8277	**0.5437**	**0.6676**	**0.7639**	0.8469	0.9117	0.9604	1.0001
80	P1	0.8039	0.5854	0.6726	0.7465	0.8119	0.8737	0.9195	0.9502
	P2	0.7694	0.4760	0.6008	0.7020	0.7786	0.8458	0.9061	0.9599
	P3	0.8703	0.5458	0.6832	0.7996	0.8888	0.9603	1.0191	1.0712
	P4	**0.8240**	0.5614	0.6742	0.7731	**0.8450**	**0.9029**	**0.9465**	**0.9801**
100	P1	**0.7556**	**0.4952**	**0.6101**	**0.6971**	**0.7674**	**0.8302**	**0.8800**	**0.9170**
	P2	**0.7514**	**0.4641**	**0.5891**	**0.6864**	**0.7608**	**0.8257**	**0.8856**	**0.9350**
	P3	0.8249	0.4931	0.6508	0.7615	0.8434	0.9110	0.9686	1.0187
	P4	0.8401	0.5826	0.6896	0.7910	0.8636	0.9183	0.9608	0.9939
120	P1	0.7595	0.4753	0.6028	0.6981	0.7698	0.8380	0.8931	0.9321
	P2	0.7826	0.4824	0.6191	0.7170	0.7967	0.8639	0.9185	0.9659
	P3	**0.8039**	0.5064	0.6435	**0.7401**	**0.8192**	**0.8838**	**0.9395**	**0.9852**
	P4	0.8653	0.6258	0.7186	0.8168	0.8870	0.9388	0.9812	1.0173
200	P1	0.8444	0.5950	0.6967	0.7820	0.8561	0.9230	0.9739	1.0037
	P2	0.7587	0.4648	0.5938	0.6907	0.7689	0.8351	0.8929	0.9476
	P3	0.8177	**0.4921**	**0.6406**	0.7487	0.8338	0.9043	0.9642	1.0122
	P4	0.8568	0.5748	0.7115	0.8052	0.8784	0.9350	0.9830	1.0207

In experiment 2, the number of hidden layer units units_r is set to 100, and the number of fully connected layer units units_fc is set to 10, 80, 120, and 200, respectively. At the same time, the model performance when both units_r and units_fc in experiment 1 are set to 100 is added to experiment 2. The model learning prediction results are shown in Table 2. Points P1 and P2 have the smallest overall RMSE when units_fc is set to 100, 0.7556 and 0.7514, respectively. The overall RMSE of point P3 is the smallest when units_fc is set to 200, which is 0.8196; the overall RMSE of point P4 is the smallest when units_fc is set to 120, which is 0.8049. The overall RMSEs of the 4 points at the same units_fc are summed and averaged, and the overall average RMSEs are 0.8201, 0.8103, 0.7930, 0.7892, and 0.8057, respectively. The analysis shows that although units_fc is set to 100, 2 points perform the best, and when units_fc is set to 120, only 1 point performs the best, but the overall performance of 4 points is better, so the number of units_fc in the fully connected layer is set to 120 for model learning.

Table 2. Prediction results of 4 points at different units_fc(RMSE)

units_fc	Plot	RMSE	Day_1	Day_2	Day_3	Day_4	Day_5	Day_6	Day_7
10	P1	0.7864	0.5813	0.6611	0.7328	0.7853	0.8512	0.8958	0.9342
	P2	0.7946	0.5648	0.6604	0.7244	0.7995	0.8582	0.9131	0.9646
	P3	0.8666	0.5556	0.6962	0.8089	0.8855	0.9477	1.0053	1.0568
	P4	0.8326	0.5791	0.6830	0.7781	0.8522	0.9085	0.9549	0.9907
80	P1	0.7681	**0.4714**	0.6073	0.7034	0.7779	0.8458	0.9056	0.9503
	P2	0.7597	0.4650	0.5945	0.6871	0.7647	0.8348	0.8989	0.9532
	P3	0.8729	0.5781	0.7004	0.8105	0.8941	0.9551	1.0083	1.0601
	P4	0.8406	0.5366	0.6820	0.7903	0.8719	0.9254	0.9685	1.0073
100	P1	**0.7556**	0.4952	0.6101	0.6971	0.7674	**0.8302**	**0.8800**	**0.9170**
	P2	**0.7514**	**0.4641**	**0.5891**	**0.6864**	**0.7608**	**0.8257**	**0.8856**	**0.9350**
	P3	0.8249	0.4931	0.6508	0.7615	0.8434	0.9110	0.9686	1.0187
	P4	0.8401	0.5826	0.6896	0.7910	0.8636	0.9183	0.9608	0.9939
120	P1	0.7594	0.5017	0.6119	0.6954	0.7676	0.8332	0.8863	0.9264
	P2	0.7726	0.4712	0.6022	0.6965	0.7808	0.8501	0.9134	0.9703
	P3	0.8198	0.5117	0.6494	0.7504	**0.8344**	**0.9033**	**0.9619**	**1.0103**
	P4	**0.8049**	**0.4941**	**0.6314**	**0.7491**	**0.8287**	**0.8927**	**0.9421**	**0.9797**
200	P1	0.7563	0.4876	**0.6070**	**0.6932**	**0.7646**	0.8312	0.8854	0.9262
	P2	0.7722	0.5101	0.6122	0.7082	0.7751	0.8397	0.9006	0.9595
	P3	**0.8196**	**0.5035**	**0.6362**	**0.7493**	0.8382	0.9062	0.9644	1.0145
	P4	0.8745	0.5907	0.7216	0.8300	0.9029	0.9540	0.9984	1.0359

Model prediction results and analysis. Based on the above experiments, point P1 is taken as an example to analyze the results. The 7-day RMSE of the test set is 0.5017, 0.6119, 0.6954, 0.7676, 0.8332, 0.8863, 0.9264, and the overall RMSE is 0.7594. Select the actual SST and predicted SST data in 2008 from the test set (366 groups in total), and draw a comparison curve between the actual SST and the weekly predicted SST, as shown in Figure 3. The absolute errors (mae) of the actual daily SST and the weekly predicted SST in the year were 0.3836, 0.4523, 0.5276, 0.5905, 0.6362, 0.6644, and 0.6827, respectively. As the forecast time increases, the absolute error gradually increases, but the error amplitude is small, and the daily error amplitude is less than 0.08℃. The SST forecast effect of the first four days in the weekly forecast is better, and it can better track the daily trend of SST and respond to its fluctuations to achieve relatively accurate forecasts, but the forecasts at extreme values are conservative. The SST forecast effect in the last three days of the weekly forecast is slightly worse. Selecting a predictor closer to the forecast time will have a better forecast effect, because the correlation between them is much closer [13], but the flux data provided by the model prediction in this paper is the data of the first two weeks of the forecast time. Therefore, the prediction effect of the last 3 days of the weekly forecast is slightly worse than that of the first 4 days.

Conclusions and Prospects. The multivariate Yellow Sea SST weekly prediction

model based on Encoder-Decoder LSTM proposed in this paper can effectively predict the daily variation trend of SST in the following week according to the SST and flux data of the first two weeks maintaining a high prediction precision. However, since the flux data used in the model prediction in this paper is the data of the first 2 weeks of the forecast time, the prediction effect of the last 3 days of the weekly prediction is slightly worse than that of the first 4 days, which is manifested in a slight decrease in the prediction accuracy.

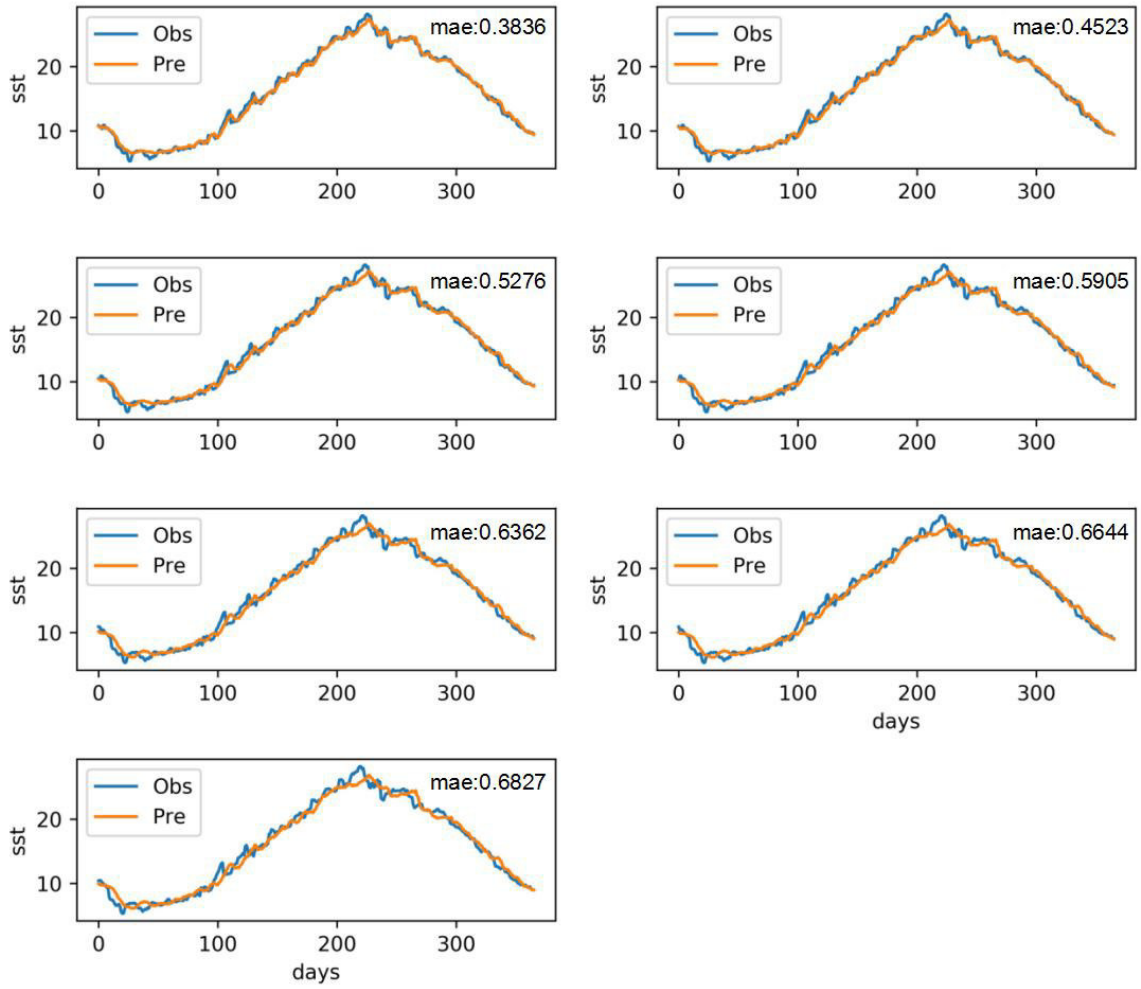


Fig. 3. Comparison curve of actual SST and weekly forecast SST (figures from left to right and from top to bottom are the comparison of actual and forecast SST in the 7 days of a week, with the horizontal axis unit of day and the vertical axis unit of ℃)

There is a certain lag in the forecast. Taking 2008 as an example, the daily absolute errors of the test set within a week are 0.3836, 0.4523, 0.5276, 0.5905, 0.6362, 0.6644, and 0.6827, and the overall RMSE is 0.7594. It can be seen from this that artificial intelligence SST forecasting can fully mine the nonlinear relationship between data, improve the accuracy and stability of sea temperature forecasting, and has very broad research and application prospects. However, due to the limitation of data, the predictors used in this paper still need to further analyze the correlation degree with SST, and make

appropriate increase or decrease to improve the learning and forecasting ability of the model. At the same time, the applicability of the model's single-point forecast in the ocean still needs further analysis and verification, which will be the next research direction of this work.

Acknowledgments. This work was supported by Sandong Provincial Key Research and Development Program (SPKR&DP) (Grant No.2019JZZY020713) ; Scientific Research Project of Education Department of Liaoning Province under contract No. QL201905，DL202001，JL202006；Dalian Science and Technology Innovation Fundation under contract No.2020JJ27SN100 ; Dalian High-level Talents Innovation Support Plan under contract No. 2020RQ113; Open Fundation of Key Laboratory of Marine Environmental Information Technology (Junru Guo); Open Foundation of Technology Innovation Center for Marine Information, MNR (Yanzhao Fu); Ministry of High Education and Science of Russian Federation (State task No. 0012-2021-0003).

We thank the Data Support from National Marine Scientific Data Center (Dalian), National Science & Technology Infrastructure of China (http://odc.dlou.edu.cn/) for providing valuable data and information.

REFERENCES

1. *Patil K., Deo M. C., Ravichandran M.* Prediction of Sea Surface Temperature by Combining Numerical and Neural Techniques // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2016. Vol. 33 (8). P. 1715–1726.

2. 张建华. 海温预报知识讲座：第一讲 海水温度预报概况 // 海洋预报. 2003. Vol. 20 (4). P. 81–85. (*Zhang Jianhua.,* SST forecast knowledge lecture: the first lecture sea water temperature forecast overview // MARINE FORECASTS. 2003. Vol. 20 (4). P. 81–85).

3. *Zhang Q., Wang H., Dong J., et al.* Prediction of Sea Surface Temperature Using Long Short-Term Memory // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2017. Vol. 14 (10). P. 1745–1749.

4. *Xike Z., Qiuwen Z., Gui Z., et al.* A Novel Hybrid Data-Driven Model for Daily Land Surface Temperature Forecasting Using Long Short-Term Memory Neural Network Based on Ensemble Empirical Mode Decomposition // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018. Vol 15 (5). P. 1032.

5. *Song G., Peng Z., Bin P., et al.* A nowcasting model for the prediction of typhoon tracks based on a long short term memory neural network // 海洋学报（英文版）. 2018. Vol. 37 (5).

6. *Zhanga J., Zhub Y., Zhanga X., et al.* Developing a Long Short-Term Memory (LSTM) based model for predicting water table depth in agricultural areas // Journal of Hydrology. 2018. P. 561.

7. *Reddy D. S., Prasad P. R.C.* Prediction of vegetation dynamics using NDVI time series data and LSTM // Modeling Earth Systems and Environment. 2018.

8. *Asanjan A. A., Yang T., Hsu K., et al.* Short-term Precipitation Forecast based on the PERSIANN system and the Long Short-Term Memory (LSTM) Deep Learning Algorithm // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2018.

9. 白盛楠, 申晓留. 基于LSTM循环神经网络的 PM_(2.5)预测 // 计算机应用与软件. 2019. Vol. 36 (01). P. 73–76. (*Bai Shengnan., Shen Xiaoliu.,* $PM_{2.5}$ Prediction based on LSTM Recurrent Neural Net-Work // Computer Applications and Software. 2019.

Vol. 36 (01). P. 73–76).

10. *Polonsky A.* The Ocean's Role in Climate Change. Cambridge Scholars Publishing. Newcastle. UK. 2021. 290 p.

11. *Polonsky A.B., Serebrennikov A.N.* Interannual and Intra-Monthly Fluctuations of the Wind Field and Sea Surface Temperature in the West African Region Based on Satellite Data // Izv., Atm. and Ocean Physics, Vol. 54, No. 9, 2018, pp. 1057–1061.

12. *Hochreiter S., Schmidhuber J.* Long Short-Term Memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9 (8). P. 1735–1780.

13. 周林, 杨成荫, 王汉杰, et al. 基于 CCA-BP-BPNN 释用模型的太平洋 SST 预报 // 解放军理工大学学报(自然科学版). 2009. Vol. 10 (4). P. 391–396. (*Zhou Lin., Yang Chengyin., Wang Hanjie., et al.* lnterpretation scheme of SST prediction in the tropical Pacific Ocean based on CCA-BP-BPNN // Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition). 2009. Vol. 10 (4). P. 391–396).

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОМЕРНОГО МЕТОДА ЕЖЕНЕДЕЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЖЕЛТОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ КОДЕРА-ДЕКОДЕРА LSTM

SUN Jiyu[1,2], ZHU Zemin[1,2], SONG Jun[1,2], GUO Junru[1,2], CAI Yu[1,2], FU Yanzhao[1,2], Wang Linhui[1,2], Polonsky A.[3]

[1]Dalian Ocean University, School of Ocean Technology and Environment,
Dalian, Liaoning 116023

[2]Operational Oceanographic Institution, Dalian Ocean University,
Dalian, Liaoning 116023

[3]Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, 28 Lenin St. 299011
E-mail: Apolonsky5@mail.ru

Для дальнейшего повышения точности и стабильности прогнозирования температуры поверхности моря в данной работе используются 25-летние исторические данные OISST V2.0 и OAFlux, а также рассматриваются такие факторы, как поток излучения, тепловой поток, скорость ветра, температура воздуха, удельная влажность воздуха и температура поверхности моря. Управляя переменными и выбирая наилучшие параметры модели, впервые была построена многомерная модель еженедельного прогнозирования температуры поверхности Желтого Моря на основе кодера-декодера LSTM (Long Short Term Memory). Модель может эффективно отслеживать тенденцию ежедневных изменений температуры поверхности моря и реагировать на ее флуктуационные изменения для получения относительно точного прогноза. На примере данных 2008 года показано, что ежедневные абсолютные ошибки тестового набора в течение недели составляют 0,3836, 0,4523, 0,5276, 0,5905, 0,6362, 0,6644 и 0,6827, а общий RMSE составляет 0,7594. Сделан вывод о необходимости дальнейших исследований по оптимизации предикторов и применимости одноточечного прогнозирования в рамках данной модели.

Ключевые слова: LSTM, CCT, Желтое море, метод искусственного интеллекта, прогноз температуры поверхности моря.

УДК 551.465.553 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-15-19

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБОВ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОКЕАНИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

А.Б. Федотов

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: fedotov57@mail.ru

В рамках численной модели трехслойного океана с глубиной слоев, соответствующей средним океаническим условиям, проведено исследование эволюции крупномасштабной циркуляции под действием стационарного неоднородного внешнего потока завихренности, моделирующего воздействие ветра. Эксперименты выполнялись с использованием явной схемы интегрирования по времени при постоянных параметрах диссипации, проанализированы характерные временные масштабы долгопериодных осцилляций энергии течений, выявлен характер изменчивости кинетической энергии верхнего слоя, проанализированы средние значения скорости течений в верхнем слое, приведены характерные поля завихренности для каждого из трех слоев.
Ключевые слова: синоптическая изменчивость, струйные течения, ветровые течения.

Поступила в редакцию 09.03.2022. После доработки: 15.03.2022.

Введение. Использование относительно простых численных моделей океанической циркуляции позволяет описывать основные физические особенности системы течений, выявлять общие закономерности, оценивать временные и пространственные характеристики исследуемого явления. Так, например, в работе [1] при пространственном разрешении 257 х 257 и 513 х 513 узлов сетки проведен ряд экспериментов, позволяющих оценить потоки энергии между слоями численной модели, авторы проводили расчеты для средних широт с использованием обычной вязкости в качестве диссипативного механизма. Численные эксперименты проводились с использованием 3-х, 6-ти и 12-слойных моделей, причем для трехслойной модели параметры стратификации были выбраны таким образом, что масштабы деформации Россби для первой и второй бароклинных мод составляли 40 и 23 км соответственно. В работе [2] численное моделирование также проводилось при пространственном разрешении 513 х 513 узлов сетки, при этом в качестве диссипативного фактора был использована бигармоническая вязкость, что позволило анализировать потоки энергии по каскаду. Океаническая циркуляция описывается преимущественно баротропной и первой бароклинной модой, при том, что значительная энергия течений имеет модовый состав более высокого порядка, и, хотя доля этой энергии достаточно быстро убывает с ростом номера моды, учет второй бароклинной моды может в значительной степени влиять на оценку временных и пространственных характеристик долговременной изменсивости океанической циркуляции. В данной работе представлены результаты моделирования океанической циркуляции в режиме долгопериодных осцилляций [2].

Уравнения и описание модели. В расчетах использована модель эволюции потенциального вихря в двухслойной жидкости для случая глубин верхнего слоя 60 м, нижнего – 3300 м и промежуточного слоя 250 м. Основное прогностическое уравнение формально выглядит как и для двухслойного океана [2] в тех же обозначениях с единственной разницей, что эволюция системы течений моделируется уже в трех слоях.

$$\frac{\partial \omega_j}{\partial t} + J\left(\psi_j, \omega_j\right) + \beta \frac{\partial \psi_j}{\partial x} =$$

$$= -\lambda_j \cdot \omega_j \cdot \delta_{j2} + W_j \cdot \delta_{j1} + D_j, \qquad (1)$$

Второе уравнение системы (2) целе-

сообразно записать в векторно-матричной форме, так как последующие преобразования системы уравнений к базису собственных векторов и обратно производится с обратной матрицей второго уравнения системы

$$\Omega = \Delta\Psi + F\Psi, \qquad (2)$$

индекс j указывает номер слоя численной модели и изменяется от 1 до 3, где ψ_j – функция тока в слое j, ω_j – завихренность в слое j, λ_j – коэффициент придонного трения, δ_{ji} – символ Кронекера, δ_{ji}= 0 при $i \neq j$ и δ_{ji} = 1 при $i = j$, D_j – диссипация, W_j – поток завихренности, генерируемой ветром, F_j – параметры стратификации для каждого из слоев, Ω и Ψ суть векторы относительной завихренности и функции тока с компонентами ω_j и ψ_j, являющимися двумерными функциями горизонтальных пространственных координат, Δ – оператор Лапласа, F матрица следующего вида:

$$F = \begin{pmatrix} -F_1 & F_2 & 0 \\ F_1 & -2F_2 & F_3 \\ 0 & F_2 & -F_3 \end{pmatrix}$$

при следующих параметрах стратификации F_1 = 25000, F_2 = 6000 и F_3 = 450, при этом масштабы Россби в размерном виде равны 54 и 21 км. Расчеты выполнены для размерного времени 325000 суток, что соответствует 890 годам модельного времени.

Диссипация в модели реализована посредством включения в расчетную схему бигармонической вязкости, для нижнего слоя также используется придонное трение. Уравнения модели были стандартным образом приведены к безразмерному виду, и расчеты выполнялись в квадратной области с длиной стороны 2π. Положительные значения оси X соответствуют направлению на восток, положительные значения оси Y соответствуют направлению на север.

В модели ставятся граничные условия непротекания и скольжения.

Численная схема. Для решения основного уравнения задачи (1) применена схема Аракавы [3].

Решение системы уравнений (2) на каждом шаге выполнялось с помощью прямого метода интегрирования путем разложения полей функции тока и относительной завихренности по собственным функциям дифференциального оператора задачи для прямоугольных (квадратных) областей [4]. Для преобразования системы уравнений (2) по вертикальным модам применялось разложение по собственным векторам матрицы F с последующим обратным преобразованием к пространственным координатам.

Структура ветрового воздействия представлена потоком завихренности, задаваемым выражением

$$W_1 = -W_0 sin(x/2) sin(y)$$

и приведена на рис. 1.

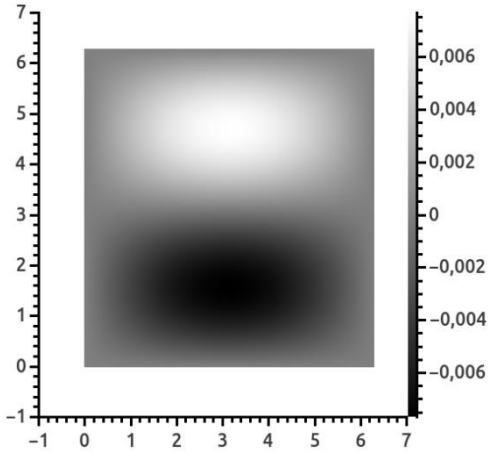


Рис. 1. Структура поля ветровой нагрузки

Fig. 1. The structure of wind stress field

Численные эксперименты. Численные эксперименты выполнялись в квадратной расчетной области с разрешением 513 узлов сетки по каждой из сторон квадрата. Эксперименты проводились при безразмерных параметрах β = 1, шаг по времени был равен 0,025 безразмерной единицы. Расчеты выполнены для параметров придонного трения λ_3= 0.04 и интенсивности потока ветровой завихренности W_0 = 0.0077.

Если размер расчетной области по аналогии с [1, 2] принять равным 3840 км, то масштаб длины L = 611 км, тогда, при $\beta = 1{,}9 \cdot 10^{-11}$ м$^{-1}$с$^{-1}$, масштаб скорости равен U = 7,09 м/с, а масштаб времени T = 1,0 суток, пространственный шаг сетки расчетной области при данном разре-

шении равнялся 7,5 км. Ниже приводятся поля завихренности только для верхнего слоя как более показательные. Как уже было указано выше, расчеты выполнялись с использованием бигармонической вязкости в качестве диссипативного члена уравнения (1), значения безразмерного коэффициента вязкости для всех трех слоев j = 1,3 в описанном ниже эксперименте было выбрано равным $2{,}4 \cdot 10^{-9}$.

Начальный период адаптации численной модели продолжительностью 85000 безразмерных единиц, что соответствует приблизительно 232 годам модельного времени, опущен. Представленные ниже результаты (рис. 2 и рис. 3) получены на основе расчетов, выполненных от состояния соответствующего развитой крупномасштабной циркуляции, полученной по данной модели в предварительных экспериментах на период времени 240000 суток или 657 лет модельного времени.

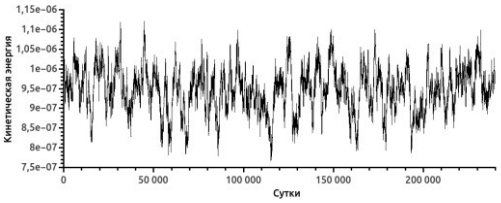


Рис. 2. Временной ход кинетической энергии верхнего слоя

Fig. 2. Time course of kinetic energy of upper layer

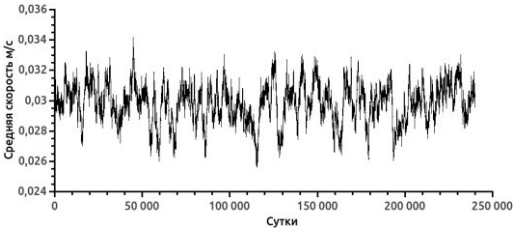


Рис. 3. Временной ход средней квадратичной скорости в верхнем слое

Fig. 3. Time course of average quadratic velocity of upper layer

В течение всего эксперимента средняя квадратичная скорость течения в верхнем слое, подверженном ветровому воздействию, варьировала от 2,6 до 3,4 см/с при среднем значении приблизительно 3,0 см/с.

Пространственная структура полей течений представлена на рис. 4–6 для каждого из слоев полями относительной завихренности как наиболее информативными для визуального анализа.

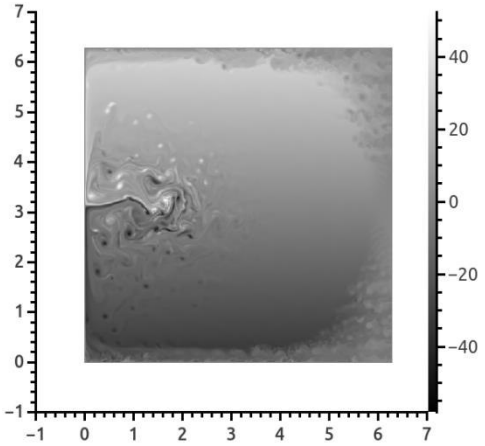


Рис. 4. Поле относительной завихренности, верхний слой

Fig. 4. Relative vorticity field, upper layer

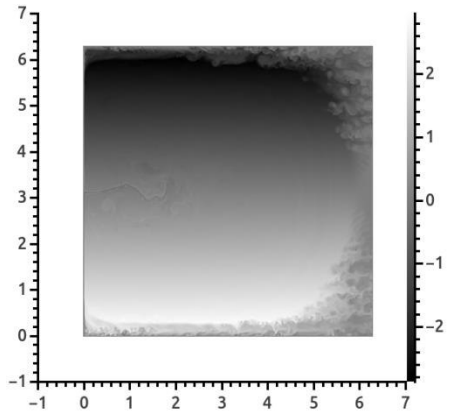


Рис. 5. Поле относительной завихренности, промежуточный слой

Fig. 5. Relative vorticity field, intermediate layer

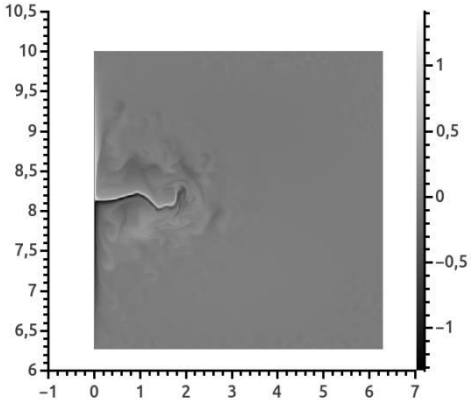


Рис. 6. Поле относительной завихренности, придонный слой

Fig. 6. Relative vorticity field, bottom layer

Отметим, что в промежуточном слое в поле завихренности хорошо выражена вторая бароклинная мода, причем на самом крупном масштабе, и находится в противофазе с завихренностью верхнего слоя. На этом фоне очень слабо заметно само струйное течение, в полной мере присутствующее в придонном слое.

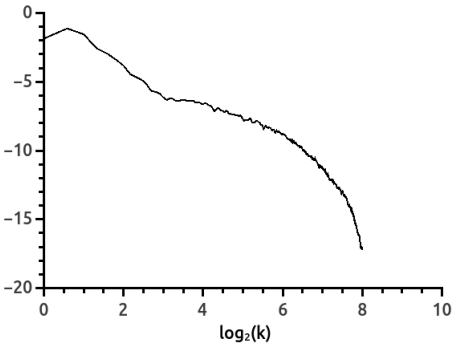


Рис. 7. Пространственный спектр кинетической энергии, верхний слой
Fig. 7. Space spectrum of rinetic energy, upper layer

Для контроля эффективности диссипативного члена уравнения (1) сделана оценка пространственного спектра (на рис. 7 приведена свертка двумерного спектра по углу) кинетической энергии течений верхнего слоя, уровень энергии в верхнем слое является доминирующим и, как видно из рисунка, применяемый коэффициент бигармонической вязкости обеспечивает отток энергии из области минимальных разрешаемых на сетке пространственных масштабов.

Важной составляющей частью проведенного эксперимента является оценка величины характерных периодов данной изменчивости, продемонстрированной на рис. 2 и рис. 3. Для этого была построена периодограмма временного хода кинетической энергии по всему массиву 240000 значений, полученных в ходе численного эксперимента. Соответствующая периодограмма приведена на рис. 8

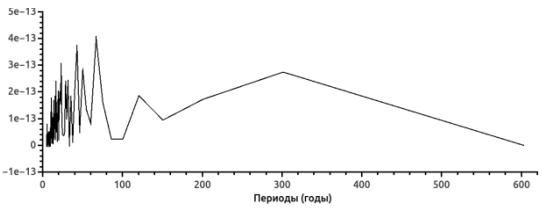


Рис. 8. Периодограмма 1 временного хода кинетической энергии, верхний слой
Fig. 8. Periodogram 1 of the time course of the kinetic energy, upper layer

Визуальный анализ собственно временного хода кинетической энергии показывает, что средний по графику участок временного хода кинетической энергии имеет более однородный характер в сравнении со всем графиком, а именно, начальный и конечный участки графика продолжительностью порядка 30000 суток каждый имеют в среднем более высокие значения энергии, нежели средний. В связи с данным обстоятельством построена дополнительная периодограмма 2 (рис. 9) по массиву 180000 данных, при данном построении исключены из анализа участки временного хода продолжительностью по 30000 суток, и периодограмма 2 построена по данным от момента 30000 суток до момента 210000 суток.

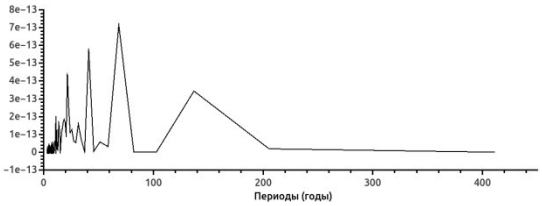


Рис. 9. Периодограмма 2 временного хода кинетической энергии, верхний слой
Fig. 9. Periodogram 2 of the time course of the kinetic energy, upper layer

Таким образом, интенсивный пик на периодограмме 1, соответствующий периоду 300 лет, при анализе принимать во внимание следует с долей скепсиса, а пики периодограмм, соответствующие периодам приблизительно в 20, 40 и 70 лет, обеспечены данными численного эксперимента вполне надежно.

Заключение. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования океана на стадии эволюции поля течений под действием пространственно неоднородного ветра при постоянных параметрах диссипации: придонного трения и коэффициента бигармонической вязкости. Показано, что разработанная трехслойная модель циркуляции океана при выбранных параметрах интенсивности силы ветра и стратификации позволяет описывать формирование струйного течения, подверженного бароклинной неустойчивости с генерацией интенсивных вихрей аналогично результатам [2], учитывая относительную простоту используемой модели, данная модель вполне адекватно демонстрирует

долгопериодные осцилляции кинетической энергии с периодами несколько десятков лет, значения средней квадратической скорости течений в верхнем слое. Все эти обстоятельства открывают достаточно широкую перспективу для использования данной
модели в исследованиях физики крупномасштабной циркуляции океана при различных параметрах как самой системы течений, так и параметрах внешнего воздействия на исследуемую систему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shevchenko Igor, Berloff Pavel.* On the role of baroclinic modes in eddy-resolving midlatitude ocean dynamics // Ocean Modeling. 2017. 111. P. 55–65.

2. *Федотов А.Б.* Долгопериодная изменчивость системы крупномасштабной циркуляции океана и мезомасштабных вихрей как явление самоорганизации // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 3. С. 206–219. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).16

3. *Arakawa A.* Computational design of long-term numerical integration of the equations of fluid motion, two-dimensional incompressible flow // Journal of Comput. Physics. 1966. Vol. 1, № 1. P. 119–143.

4. *Roache Patrick J.* Computational fluid dynamics. Hermosa Publishers Albuquerque, N.M. 1972.

TIME SCALE ANALYSIS OF LONG-PERIOD VARIABILITY OF OCEANIC CIRCULATION USING A THREE-LAYER NUMERICAL MODEL

A.B. Fedotov

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

Within the framework of a numerical model of a three-layer ocean with a depth of layers corresponding to average oceanic conditions, a study of the evolution of large-scale circulation under the action of a stationary inhomogeneous external vorticity flow simulating the effect of wind has been carried out. The experiments were carried out using an explicit time integration scheme with constant dissipation parameters, the characteristic time scales of long-period oscillations of the flow energy were analyzed, the nature of the variability of the kinetic energy of the upper layer was revealed, the average values of the flow velocity in the upper layer were analyzed, the characteristic vorticity fields for each of the three layers were given.

Keywords: synoptic variability, large-scale variability, wind-forced currents.

REFERENCES

1. *Shevchenko Igor and Berloff Pavel.* On the role of baroclinic modes in eddy-resolving midlatitude ocean dynamics. *Ocean Modeling*, 2017, Vol. 111, pp. 55–65.

2. *Fedotov A.B.* Dolgoperiodnaya izmenchivost' sistemy krupnomasshtabnoj cirku-lyacii okeana i mezomasshtabnyh vihrej kak yavlenie samoorganizacii (Long-period variability of large-scale circulation system and mesoscale vortices as self-organization phenomenon). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2019, Vol. 47, No. 3, pp. 206–219. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).16

3. *Arakawa A.* Computational design of long-term numerical integration of the equations of fluid motion, two-dimensional incompressible flow. *Journal of Comput. Physics*, 1966, Vol. 1, No. 1, pp. 119–143.

4. *Roache Patrick J.* Computational fluid dynamics. Hermosa Publishers Albuquerque, N.M. 1972.

УДК 578.4 (262.5) DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-20-27

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ИНДИКАТОРНЫХ АЛЬГОВИРУСОВ В ПЕРИОД КАРАНТИНА ПО COVID-19 (2020–2021 гг.)

О.А. Степанова[1], С.А. Шоларь[2]

[1]Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: solar-ua@ya.ru
[2]ФИЦ Морской гидрофизический институт РАН, РФ, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: sa.sholar@mail.ru

Проведены анализ и оценка результатов мониторинга двух индикаторных альговирусов *Tetraselmis viridis* и *Phaeodactylum tricornutum*, изолируемых из трех отличающихся по экологическому благополучию бухт Севастополя, в период пандемии Covid-19 (2020–2021 гг.) на фоне результатов многолетнего мониторинга за 2002–2019 гг. Выявлено улучшение экологической ситуации изучаемых бухт Севастополя в годы пандемии. Это, вероятно, связано с тем, что период пандемии Covid-19 в ситуации ограничительных и карантинных мер, проводимых в г. Севастополе, сопровождался снижением антропогенного пресса и содействовал улучшению экологического статуса морских акваторий.

Ключевые слова: индикаторные черноморские альговирусы и микроводоросли *Tetraselmis viridis* и *Phaeodactylum tricornutum,* экологический статус бухт Севастополя, период пандемии Covid-19.

Поступила в редакцию: 20.10.2021.

Введение. Период пандемии Covid-19 в 2020–2021 гг. отличался особыми условиями ограничительных и карантинных мер, что сопровождалось самоизоляцией, снижением активности многих видов деятельности, в т.ч. промышленно-производственной, транспортно-миграционной, туристической и прочих. Известно, что еще до начала пандемии исследователи предупреждали, что снижение экономической активности поможет уменьшить глобальное потепление, а также загрязнение воздуха и гидросферы, что позволит окружающей среде медленно восстанавливаться [1].

Ограничительные в период пандемии Covid-19 мероприятия, несомненно, привели к снижению выбросов парниковых газов, улучшению качества воды и воздуха, снижению уровня шумового загрязнения и, в некоторых случаях, к восстановлению дикой природы [1, 2].

Логично предположить, что возникшее в период карантинных мер из-за пандемии Covid-19 снижение антропогенного пресса на природу, в т.ч. и на гидросферу, могло отразиться на улучшении экологической ситуации в акваториях бухт Севастополя. А это, в свою очередь, как ответную реакцию морской биологической составляющей на более благоприятный экологический фон, можно зафиксировать по статусу и состоянию, в т.ч. и численным изменениям, индикаторных организмов и экологических индикаторов. Подобного плана исследования проводятся как в полевых, так и в лабораторных условиях с использованием индикаторных микроводорослей [3–8]. Подробное раскрытие таких понятий, как «биологический мониторинг», «биологический индикатор», «оценка и прогноз состояния биотической составляющей биосферы для управления качеством окружающей среды» и др. представлено в обзоре истории развития экологического мониторинга и его состояния на современном этапе [9].

Анализ результатов многолетнего мониторинга (2002–2020 гг.) черноморских альговирусов двух индикаторных к экологической ситуации микроводорослей *Tetraselmis viridis* (альговирус TvV) и *Phaeodactylum tricornutum* (альговирус PtV) установил возможность применения мониторинга этих вирусов (TvV и PtV) в качестве экологических индикаторов или индикаторных альговирусов и как составляющую комплексного экомониторинга [10].

Цель выполненного исследования – оценка результатов мониторинга двух индикаторных альговирусов (TvV и PtV), изолируемых из трех отличающихся по экологическому благополучию бухт Севастополя, в период снижения антропогенного пресса при пандемии Covid-19 (2020–2021 гг.) на фоне результатов многолетнего мониторинга.

Материалы и методы. Поиск и изоляция альговирусов микроводорослей *T. viridis* (TvV) и *P. tricornutum* (PtV) ведется с 2002 г. из проб морской воды, отбираемой не чаще 1 раза в месяц из трех различающихся по экологическому благополучию бухт Севастополя с использованием запатентованных авторских способов, что подробно описано [10–12].

В представляемом сообщении бухты Севастополя были обозначены как № 1 (открытая, относительно экологически благополучная бухта), № 2 (закрытая, с функционирующей мидийной фермой, относительно экологически благополучная бухта) и № 3 (закрытая, подвергающаяся антропогенному воздействию, экологически неблагополучная бухта).

В 2020 г. в связи со строгой самоизоляцией пробы морской воды были отобраны в январе–марте, а в 2021 г. – в январе–июне. Для сравнительного анализа результатов мониторинга индикаторных альговирусов за годы пандемии Covid-19 в отдельном исследовании были использованы данные за январь–июнь каждого года за период 2015–2021 гг.

Жидкие альгологически чистые культуры микроводорослей *T. viridis* и *P. tricornutum* получали из коллекции живых культур микроводорослей отдела экологической физиологии водорослей ФИЦ “ИнБЮМ им. А.О. Ковалевского РАН”. Культуры микроводорослей поддерживались в стабилизирующей среде Гольдберга.

Результаты и обсуждение. Результаты изоляции альговирусов двух видов индикаторных микроводорослей *T. viridis* и *P. tricornutum* представлены на рис. 1 в виде графиков (А) и диаграмм (Б) изменения частоты (%) изоляции TvV и PtV в период с 2002 по 2021 гг.

Из данных, отраженных на рис. 1, можно видеть, что по 2019 г. включительно частота изоляции индикаторного альговируса чувствительной к экологическому состоянию акваторий морской микроводоросли *P. tricornutum* была зафиксирована в пределах от 0–11% (в 2015 и 2006 гг. соответственно) до 44–45% (в 2018 и 2008 гг. соответственно). Однако в 2020 и 2021 гг. частота изоляции этого индикаторного вируса впервые увеличивается до значений 89% и 78% соответственно. Такие высокие значения частоты изоляции альговируса чувствительной к условиям окружающей среды черноморской микроводоросли *P. tricornutum* были установлены впервые за весь период 2002–2021 гг. и свидетельствуют об относительном экологическом благополучии акваторий изучаемых бухт Севастополя.

Максимальная частота изоляции альговируса устойчивой к экологической ситуации черноморской микроводоросли *T. viridis* за период 2002–2019 гг. была отмечена в пределах 52% (2015 г.) и 54% (2002–2003 гг.). Однако в 2020–2021 гг. частота изоляции TvV достигает наивысшего значения – 67% в 2021 г. Тем не менее, частота изоляции индикаторного альговируса чувствительной к экологической ситуации черноморской микроводоросли в 2021 г. – 78%, что выше частоты изоляции альговируса устойчивой к условиям среды микроводоросли *T. viridis.* В данном случае наблюдается увеличение частоты изоляции двух индикаторных альговирусов, как ответная реакция представителей гидросферы на улучшение экологии в акватории. Такие факты увеличения числа и частоты изоляции выделяемых из акватории альговирусов, свидетельствующие об улучшении экологической ситуации, рассматривались в нашей публикации [10]. Было установлено, что для изучаемых относительно экологически благополучных акваторий характерно максимальное количество всех изолятов альговирусов (как TvV, так и PtV) с численным преобладанием штаммов альговируса PtV требовательной к условиям среды микроводоросли *P. tricornutum.*

Результаты поиска и изоляция из трех отличающихся по экологическому благополучию бухт Севастополя альго-

вирусов двух видов черноморских микроводорослей – устойчивой *T. viridis* (альговирус TvV) и требовательной *P. tricornutum* (альговирус PtV) в 2015–2021 гг. за первое полугодие (за январь–июнь) подробно представлены в табл. 1.

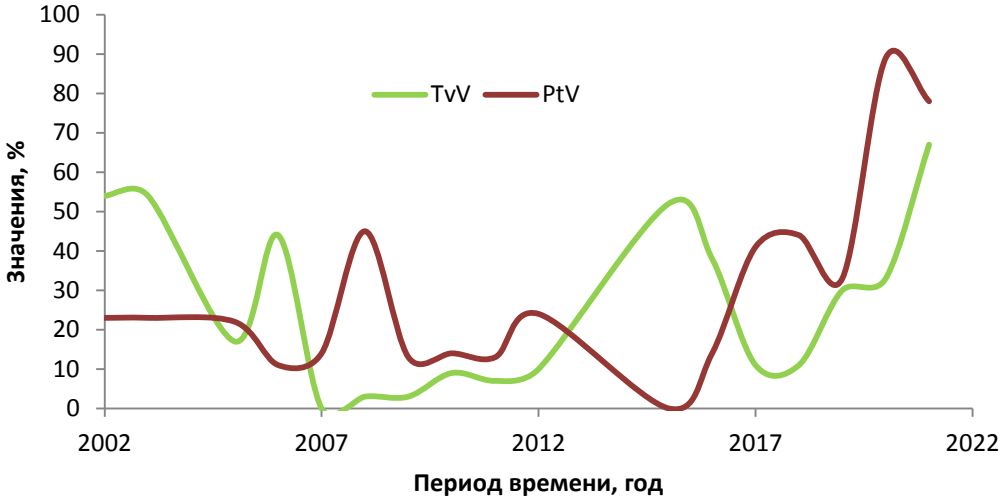


Рис. 1 (А)

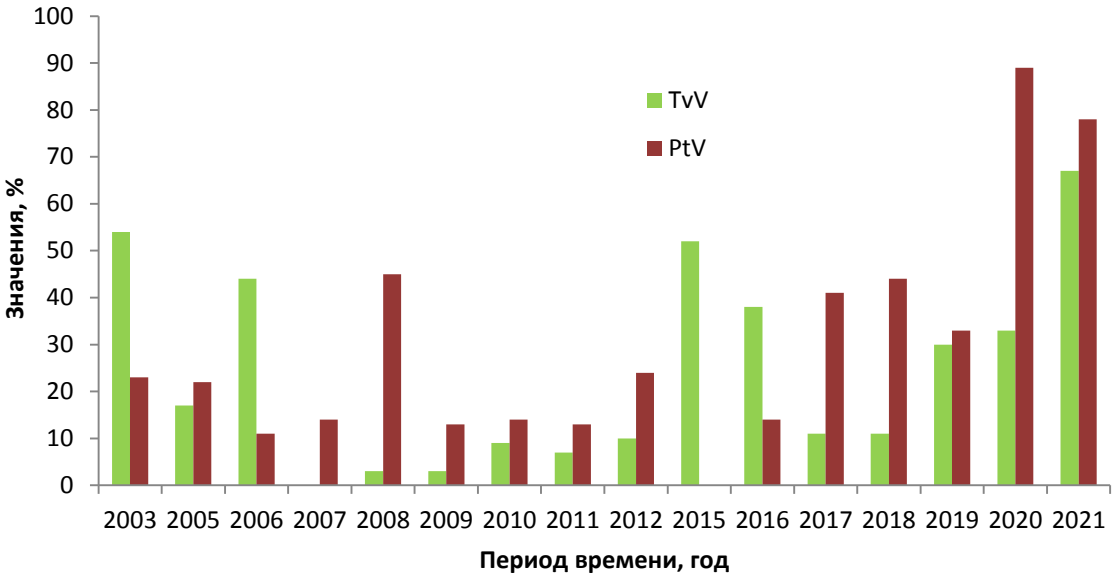


Рис. 1 (Б)

Рис. 1. Изменения частоты (%) изоляции альговирусов микроводорослей *Tetraselmis viridis* (TvV) и *Phaeodactylum tricornutum* (PtV) из проб морской воды трех, отличающихся по экологическому благополучию бухт Севастополя (№ 1, № 2, № 3) в период с мая 2002 по июнь 2021 гг. в виде графиков (А) и диаграмм (Б)

Fig. 1. Changes in the frequency (%) of isolation of algal viruses of the microalgae *Tetraselmis viridis* (TvV) and *Phaeodactylum tricornutum* (PtV) from seawater samples from three differing in the ecological well-being of Sevastopol bays (No. 1, No. 2, No. 3) from May 2002 to June 2021 as graphs (A) and diagrams (B)

Таблица 1. Результаты поиска и изоляция в 2015–2021 гг. (за первое полугодие каждого года – период январь – июнь) штаммов альговирусов двух видов черноморских микроводорослей – устойчивой к факторам среды *Tetraselmis viridis* (альговирус - TvV) и требовательной *Phaeodactylum tricornutum* (альговирус - PtV) – TvV/PtV – из трех бухт Севастополя, отличающихся по экологическому благополучию

Бухта	Год	Месяцы I – VI (январь – июнь)						Итого
		I	II	III	IV	V	VI	
№ 1	2015	-/-	1/-	1/-	1/-	1/-	-/-	4/-
	2016	ни	-/-	1/-	1/-	-/-	-/-	2/-
	2017	-/-	-/1	1/1	-/-	-/-	-/-	1/2
	2018	1/1	-/-	-/1	-/1	-/1	-/-	1/4
	2019	-/1	1/-	-/-	-/-	-/-	ни	1/1
	всего	1/2	2/1	3/2	2/1	1/1	-/-	9/7
		3	3	5	3	2		16
	2020	-/1	1/1	-/1	ни	ни	ни	1/3
	2021	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/-	6/5
	всего	1/2	2/2	1/2	1/1	1/1	1/-	7/8
		3	4	3	2	2	1	15
Всего, бухта № 1		2/4	4/3	4/4	3/2	2/2	1/-	16/15
		6	7	8	5	4	1	31
№ 2	2015	1/-	1/-	-/-	-/-	-/-	-/-	2/-
	2016	ни	-/-	-/-	-/1	-/-	-/-	-/1
	2017	1/-	-/1	-/1	-/-	-/-	-/-	1/2
	2018	-/-	-/-	-/1	-/1	-/-	-/-	-/2
	2019	-/1	-/ 1	-/1	-/-	1/1	ни	1/4
	всего	2/1	1/2	-/3	-/2	1/1	-/-	4/9
		3	3	3	2	2	-	13
	2020	-/1	1/1	1/1	ни	ни	ни	2/3
	2021	-/1	-/1	1/1	-/-	1/1	-/-	2/4
	всего	-/2	1/2	2/2	-/-	1/1	-/-	4/7
		2	3	4	-	2	-	11
Всего, бухта № 2		2/3	2/4	2/5	-/2	2/2	-/-	8/16
		5	6	7	2	4	-	24
№ 3	2015	ни	ни	-/-	1/-	-/-	-/-	1/-
	2016	ни	-/-	-/-	1/-	-/-	-/-	1/-
	2017	-/-	-/1	-/-	-/-	-/-	-/-	-/1
	2018	-/1	-/-	-/1	-/-	-/-	-/-	-/2
	2019	-/-	1/-	-/-	-/-	-/-	ни	1/-
	всего	-/1	1/1	-/1	2/-	-/-	-/-	3/3
		1	2	1	2	-	-	6
	2020	-/1	-/1	-/-	ни	ни	ни	-/2
	2021	-/1	1/1	-/1	1/1	1/1	1/-	4/5
	всего	-/2	1/2	-/1	1/1	1/1	1/-	4/7
		2	3	1	2	2	1	11
Всего, бухта № 3		-/3	2/3	-/2	3/1	1/1	1/-	7/10
		3	5	2	4	2	1	17
За период 2015–2019 гг.		3/4	4/4	3/6	4/3	2/2	-/-	16/19
		7	8	9	7	4	-	35
За период 2020–2021гг.		1/6	4/6	3/5	2/2	3/3	2/-	15/22
		7	10	8	4	6	2	37

Обозначения: ни – исследования не проводили.

Из данных, отраженных в табл. 1, можно видеть, что за 5 лет «доковидного» периода (2015–2019 гг.) было изолировано всего (в сумме как TvV, так и PtV) 35 вирусных штаммов, однако за 2 года «ковидного» периода (2020 – 2021 гг.) – было изолировано 37 вирусных штаммов. Простое математическое действие позволяет определить среднее значение изолированных за два года штаммов альговирусов в пятилетний период 2015–2019 гг. Так общее число вирусных изолятов 35 при делении на 5 (5 лет) и умножении на 2 (2 сравниваемых года) позволяет получить число 14, которое и можно сравнивать с числом 37 – количеством вирусных изолятов за два последних «ковидных» года (2020–2021 гг). В итоге логично утверждать, что изоляция альговирусов в период пандемии Covid-19 более чем в 2 раза выше, чем в докарантинный («доковидный») период.

То же можно отметить и для отдельно взятых вирусных штаммов TvV и PtV. В 2020–2021 гг. было изолировано 15 штаммов TvV и 22 штамма PtV. При пересчете на среднее значение для двухгодичного периода за 2015–2019 гг. определено примерно 6 штаммов TvV и 8 штаммов PtV. Эти данные свидетельствуют, что за равный промежуток времени (2 года) изоляция индикаторных альговирусов чувствительной к условиям среды черноморской микроводоросли *P. tricornutum* в период пандемии Covid-19 (2020–2021 гг.) была почти в 3 раза выше, чем в докарантинное время.

По нашему мнению, особого внимания заслуживают результаты изоляции штаммов индикаторных альговирусов из морской воды бухты № 3 (закрытая, подвергающаяся антропогенному воздействию, экологически неблагополучная бухта). Если сравнивать результаты изоляции альговирусов из относительно экологически благополучных бухт № 1 и № 2 в «ковидный» и «доковидный» периоды, то можно отметить, что различия в числе выделенных вирусов не превышают значения на 1–2 штамма, хотя в одном случае данные представлены за 2 года, а в другом – за 5 лет. Однако результаты изоляции альговирусов из проб морской воды закрытой, подвергающейся антропогенному воздействию, экологически неблагополучной бухты № 3 указывают на то, что даже за два года «ковидного» периода было изолировано почти в 2 раза больше альговирусов, чем за 5 лет «доковидного». При этом в 2015–2019 гг. из морской воды бухты № 3 было изолировано равное количество штаммов альговирусов TvV и PtV (по 3 каждого), однако в 2020–2021 гг. штаммов PtV было выделено 7, в то время как штаммов TvV – 4. Таким образом, изоляция альговирусов в бухте № 3 в «ковидный» период (по сравнению с «доковидным») соответствует значениям для относительно экологически благополучных акваторий, для которых характерно максимальное количество всех изолятов альговирусов (как TvV, так и PtV) с численным преобладанием штаммов альговируса PtV требовательной к условиям среды микроводоросли *P. tricornutum* [10].

При учете результатов 2021 г. только за период январь–март для сравнения за этот же период данных за 2020 г. установлено, что всего из 9 тестируемых проб в 2021 г. было изолировано 14 штаммов альговирусов – 5 TvV и 9 PtV, что незначительно больше, чем в 2020 г., когда из 9 проб было изолировано 11 вирусных штаммов – 3 TvV и 8 PtV.

Таким образом, как для 2020 г., так и 2021 г. характерен максимум частоты изоляции PtV – 89% и 78% соответственно. Столь высокие значения были определены впервые за многолетний период мониторинга 2002–2021 гг. Также в 2020 и 2021 гг. наблюдается высокое общее значение количества штаммов всех индикаторных альговирусов с численным преобладанием штаммов PtV.

Заключение. Выполненные анализ и оценка результатов мониторинга двух индикаторных альговирусов (TvV и PtV), изолируемых из трех отличающих-

ся по экологическому благополучию бухт Севастополя, в период пандемии Covid-19 (2020–2021 гг.) на фоне результатов многолетнего мониторинга за 2002–2019 гг. позволили утверждать, что экологическая ситуация изучаемых бухт Севастополя в годы пандемии относительно благополучна. Следовательно, период пандемии Covid-19 в ситуации ограничительных и карантинных мер, проводимых в г. Севастополь, сопровождался снижением антропогенного пресса, что содействовало улучшению экологического статуса морских акваторий.

Работа подготовлена в рамках госбюджетной темы ИПТС № 0012-2021-0010 «Разработка новых средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод» (№ госрегистрации 121122300070-9) и госбюджетной темы ФИЦ МГИ РАН № 0555-2021-0003 «Оперативная океанология».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сокращение* выбросов и горы медицинского мусора: экологические последствия эпидемии COVID–19 https://hightech.fm/2020/05/06/covid-ecology (дата обращение 01.10.2021).

2. *Сердце* и легкие: как вирус спас 11 тысяч европейцев. Улучшение экологии при пандемии спасло жизни 11 тыс. европейцев https://www.gazeta.ru/science/2020/04/30_a_13067821.shtml (дата обращение 1.10.2021).

3. *Дятлов С.У., Петросян А.Г. Phaeodactylum tricornutum Bohl*. (Chrysophyta) как тест-объект. Общие положения // Альгология. 2001. Т. 11. № 1. С. 145–154.

4. *Капков В.И.* Водоросли как биомаркеры загрязнения тяжелыми металлами морских прибрежных экосистем: автореф. дис. … д-ра биол. наук. М., 2003. 48 с.

5. *Капков В.И., Шошина Е.В., Беленикина О.А.* Использование морских одноклеточных водорослей в биологическом мониторинге // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета, изд-во ФГБОУ ВО «Мурманский государственный технический университет» (Мурманск). 2017. Т. 20, № 2. С. 308–315.

6. *Кузьминова Н.С., Руднева И.И.* Влияние сточных вод на морские водоросли // Альгология. 2006. Т. 15. № 1. С. 128–141.

7. *Маркина Ж.В., Айздайчер Н.А. Dunaliella salina* (Chlorophyta) как тест-объект для оценки загрязнения морской среды детергентами // Биология моря. 2005. Т. 31. № 4. С. 274–279.

8. *Маркина Ж.В., Айздайчер Н.А.* Применение микроводоросли *Phaeodactilum tricornutum* Bohlin (Bacillariophyta) для оценки качества вод залива Находка Японского моря (Россия) // Альгология. 2014. Т. 24. № 4. С. 551–559.

9. *Мониторинг* и контроль состояния окружающей среды: вчера, сегодня. завтра / А.Н. Камнев, Л.Г. Богатырев, И.В. Стуколова [и др.] // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2021. № 3. С. 79–87.

10. *Степанова О.А.* Мониторинг черноморских альговирусов *Tetraselmis viridis* и *Phaeodactylum tricornutum* в бухтах Севастополя как составляющая экологического мониторинга изучаемых акваторий // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3 (41). С. 139–148.

11. *Степанова О.А.* Способ изоляции альговирусов одноклеточных водорослей, например, *Platymonas viridis* Rouch (Chlorophita) // Патент Украины № 65864. 2004. Бюл. № 4.

12. *Степанова О.А.* Способ изоляции альговирусов микроводоросли *Phaeodactylum tricornutum* (Bacillario-phyta) из проб морской воды // Патент Украины № 97293. 2012. Бюл. № 2.

EVALUATION OF THE RESULTS OF MONITORING INDICATOR ALGAL VIRUSES DURING THE COVID-19 QUARANTINE PERIOD (2020–2021)

O.A. Stepanova[1], S.A. Sholar[2]

[1]Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[2]FRC Marine Hydrophysical Institute of RAS, RF, Sevastopol, Kapitanskaya St., 2

The analysis and evaluation of the results of monitoring two indicator algal viruses of *Tetraselmis viridis* and *Phaeodactylum tricornutum*, isolated from three differing in ecological well-being bays of Sevastopol during the pandemic of Covid-19 (2020–2021) were carried out against of the background of the results of long-term monitoring (2002–2019). An improvement in the ecological situation of the studied bays of Sevastopol during the years of the pandemic was revealed. This is probably due to the fact that the period of the Covid-19 pandemic in the situation of restrictive and quarantine measures carried out in the city of Sevastopol was accompanied by a decrease in anthropogenic pressure and contributed to the improvement of the ecological status of marine areas.
Keywords: Black Sea indicator algal viruses and microalgae *Tetraselmis viridis* and *Phaeodactylum tricornutum,* the ecological status of the bays of Sevastopol, the pandemic period of the Covid-19.

REFERENCES

1. *Sokrashchenie vybrosov* i gory medicinskogo musora: ekologicheskie posledstviya epidemii COVID–19 (Reducing of emissions and the mountains of medical waste: the environmental consequences of the COVID-19 epidemic) https://hightech.fm/2020/05/06/covid-ecology (October 1, 2021).

2. *Serdce* i legkie: kak virus spas 11 tysyach evropejcev. Uluchshenie ekologii pri pandemii spaslo zhizni 11 tys. Evropejcev (Heart and lungs: how the virus saved 11 thousand Europeans. Improving the ecology during the pandemic saved the lives of 11 thousand Europeans) https://www.gazeta.ru/science/2020/04/30_a_13067821.shtml (October 1, 2021).

3. *Dyatlov S.U. and Petrosyan A.G. Phaeodactylum tricornutum* Bohl. (Chrysophyta) kak test-ob"ekt. Obshchie polozheniya (*Phaeodactylum tricornutum* Bohl. (Chrysophyta) as a test object. General provisions). *Al'gologiya*. 2001, Vol. 11, No. 1, pp.145–154.

4. *Kapkov V.I.* Vodorosli kak biomarkery zagryazneniya tyazhelymi metallami morskih pribrezhnyh ekosiste: Avtoref. Diss. d-ra biol. nauk (Algae as biomarkers of heavy metal pollution in marine coastal ecosystem. Synopsis of Dr. biol. sci., thesis), Moscow, 2003, 48 p.

5. *Kapkov V.I., Shoshina E.V., and Belenikina O.A.* Ispol'zovanie morskih odnokletochnyh vodoroslej v biologicheskom monitoring (The use of marine unicellular algae in biological monitoring). *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, izdatel'stvo FGBOU VO «Murmanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet» (Murmansk),* 2017, Vol. 20, No. 2, pp. 308–315.

6. *Kuz'minova N.S and Rudneva I.I.* Vliyanie stochnyh vod na morskie vodorosli (Effects of wastewater on seaweed). *Al'gologiya,* 2006, Vol. 15, No. 1, pp. 128–141.

7. *Markina ZH.V. and Ajzdajcher N.A. Dunaliella salina* (Chlorophyta) kak test-ob"ekt dlya ocenki zagryazneniya morskoj sredy detergentami (*Dunaliella salina* (Chlorophyta) as a test object for assessing marine environment pollution with detergents). *Biologiya morya*, 2005, Vol. 31, No. 4, pp. 274–279.

8. *Markina ZH.V. and Ajzdajcher N.A*. Primenenie mikrovodorosli *Phaeodactilum tricornutum* Bohlin (Bacillariophyta) dlya ocenki kachestva vod zaliva Nahodka Yaponskogo morya (Rossiya) (Application of microalgae *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin (Bacillariophyta) to assess the quality of waters in the Nakhodka Bay of Japan Sea (Russia)). *Al'gologiya*, 2014, Vol. 24, No. 4, pp. 551–559.

9. *Kamnev A.N., Bogatyrev L.G., Stukolova I.V., YAkovlev A.S., and Rybal'skij N.G.* Monitoring i kontrol' sostoyaniya okruzhayushchej sredy: vchera, segodnya. zavtra (Environmental monitoring and control: yesterday, today, tomorrow). *Ispol'zovanie i ohrana prirodnyh resursov v Rossii*, 2021, No. 3, pp. 79–87.

10. *Stepanova O.A.* Monitoring chernomorskih al'govirusov *Tetraselmis viridis* i *Phaeodactylum tricornutum* v buhtah Sevastopolya kak sostavlyayushchaya ekologicheskogo monitoringa izuchaemyh akvatorij (Monitoring of Black Sea algal viruses *Tetraselmis viridis* and *Phaeodactylum tricornutum* in bays of Sevastopol as a component of ecological monitoring of the studied aquatories). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2020, Vol. 41, No. 3 (41), pp. 139–148. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-3-139-148.

11. *Stepanova O.A*. Sposob izolyacii al'govirusov odnokletochnyh vodoroslej, naprimer *Platymonas viridis* Rouch (Chlorophita) (A method for isolating of algal viruses of unicellular algae, for example, *Platymonas viridis* Rouch (Chlorophita)). Patent Ukrainy, No. 65864, 2004, Byul. No. 4.

12. *Stepanova O.A.* Sposob izolyacii al'govirusov mikrovodorosli *Phaeodactylum tricornutum* (Bacillariophyta) iz prob morskoj vody (A method for isolating of algal viruses of microalgae *Phaeodactylum tricornutum* (Bacillariophyta) from sea water samples). Patent Ukrainy, No. 97293, 2012, Byul. No. 2.

УДК 577.346 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-28-42

АНАЛИЗ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АВАРИИ

Л.И. Лукина, Д.В. Моисеев

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: dmitriymoiseev@mail.ru

Чернобыльская авария стала одной из крупнейших техногенных катастроф с катастрофическими радиоэкологическими, медико-биологическими, социально-экономическими последствиями. Проанализированы радиоэкологические особенности аварии на Чернобыльской АЭС, такие как динамика радиоактивных выбросов, состав и активность попавших в окружающую среду радионуклидов, соотношение радиоцезия и радиостронция, формы и состав радиоактивных выбросов, влияние метеоусловий на распространение радиоактивного облака, загрязнение 30-км зоны и её преобразование в зону отчуждения, автореабилитационные процессы и реабилитационные мероприятия по возвращению отчужденных земель, проблема плутония и америция чернобыльского происхождения.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, особенности аварии, радионуклиды, радиационное загрязнение, радиоэкологические последствия, радиоэкологический мониторинг.

Поступила в редакцию: 01.03.2022. После доработки: 14.03.2022.

Введение. Авария на Чернобыльской АЭС стала одной из крупнейших техногенных катастроф, а её радиоэкологические, медико-биологические, социально-экономические последствия были катастрофическими.

Отличительной особенностью Чернобыльской аварии явились большие масштабы выброса радиации (до 50 млн Ки) и глобальные загрязнения огромной территории (миллионы га) радионуклидами.

Вследствие разрушения конструкций 4-го энергоблока в результате двух взрывов и резкого повышения температуры, сопровождавшегося образованием огромных объемов паро-газо-аэрозольной смеси из перегретого пара, скопившихся газовых и легколетучих продуктов ядерного деления урана, а также начавшегося пожара графитовой кладки реактора РБМК, поддерживаемого большой энергией ядерных реакций в оставшемся в реакторе ядерном топливе, произошел интенсивный длительный выход радиоактивности в атмосферу в форме струи, которая непрерывно меняла свое направление, следуя розе ветров, в течение 10 суток.

Масштабы аварии, длительность выбросов, разнообразие состава и физических форм выбрасываемого радиоактивного материала, метео- и погодные условия во время распространения радиоактивного облака, ландшафт местности, над которым оно проходило – все эти факторы внесли свой вклад в процесс радиоактивного загрязнения территорий. В данной статье делается анализ этих факторов, обусловивших радиоэкологические особенности чернобыльской аварии.

Динамика радиоактивных выбросов. Одной из особенностей чернобыльской аварии является её пролонгированный характер [1, 2]. Суточный выброс радиоактивных веществ во время аварии был наибольшим в первые сутки, затем, в период с 27.04 по 02.05 его интенсивность значительно уменьшилась, но в течение последующих четырех дней, вплоть до 05.05, интенсивность выбросов стала нарастать и неожиданно 06.05 резко сократилась (рис. 1) [3].

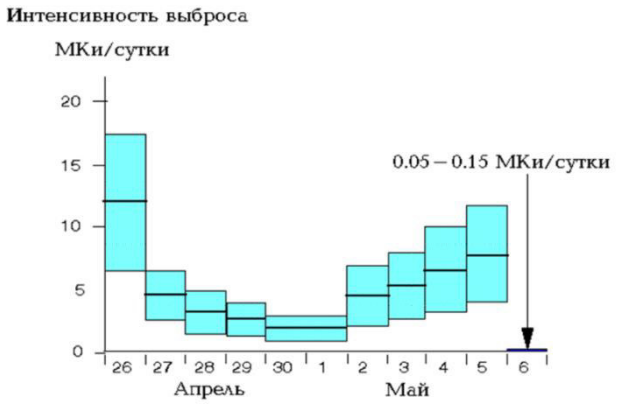


Рис. 1. Посуточная интенсивность радиоактивного выброса (без учета благородных газов) [3]
Fig. 1. Daily intensity of radioactive release (excluding noble gases) [3]

Выделяют четыре стадии радиоактивных выбросов [4], из которых три первые являются активными.

1. «Эксплозийная» стадия (26.04), которая обусловлена, распространением паро-газо-аэрозольной смеси, вырвавшейся в результате взрыва перегретого пара и последовавшего практически мгновенно за ним второго взрыва, предположительно обусловленного взрывом водородно-воздушной смеси, снесшего крышу 4-го энергоблока и разрушившего его помещения, что сопровождалось горением графита, выбросом продуктов деления в виде разлетевшегося мелкодисперсного топлива и разбросом по территории вблизи 4-го блока отдельных макро-фрагментов топлива и обломков оборудования. Поднявшаяся на большую высоту, до 1-2 км, газоаэрозольная струя содержала газообразные и легколетучие радионуклиды радиоактивных благородных газов, изотопов йода, цезия, теллура, а также накопленные во время работы реактора продукты ядерного деления (ПЯД) урана, адсорбированные на мелкодисперсных частицах ядерного топлива и графита.

2. «Эманацийная низкотемпературная» стадия (27.04–02.05) характеризовалась медленным во времени уменьшением мощности выброса радиоактивных веществ. Это было вызвано постепенным снижением температуры топливосодержащих масс, вследствие ряда принятых мер, направленных на предотвращение неуправляемой цепной реакции и уменьшение выбросов из разрушенного реактора в атмосферу. Известно, что были предприняты беспрецедентные меры, направленные на тушение пожара и прекращение ядерной реакции, продолжающейся в реакторе. С вертолетов производилось засыпание реактора смесью из свинца, песка, карбида бора, глины, доломита. Температура колебалась в пределах 600–1000°С, в атмосферу поступали наиболее летучие элементы и их соединения, среди которых преобладали изотопы теллура, йода, цезия, разнесшиеся с потоками воздуха на огромные расстояния, и продолжался выброс мелкодиспергированного топлива и углеродного пепла, на частицах которого в адсорбированном виде содержались ПЯД.

3. «Эманацийная высокотемпературная» стадия (02.05–05.05) – вызванная повышением температуры топливосодержащих масс до 2000°С и более, сопровождалась соответствующим увеличением мощности выброса, увеличением в нем количества частиц тугоплавких элементов стронция, циркония, церия, изотопов плутония и других трансурановых элементов (ТУЭ), выпавших в ближней зоне реактора на расстояниях до 100–200 км.

4. Четвертая, неактивная, стадия (после 05.05) – выброс радионуклидов резко уменьшился. Причина затухания ядерных превращений в оставшемся внутри реактора топливе и столь резкого спада выбросов до сих пор не ясна. Однако залповые выбросы радиоактивности наблюдались почти до конца мая 1986 г.

Состав и активность радионуклидов, выброшенных в окружающую среду. В радиоактивных выбросах содержалось около 200 радиоизотопов элементов, представляющих собой ПЯД и ТУЭ в разных фазовых и химических формах, которые перемещались в атмосфере по сложным траекториям на различные расстояния. Летучие радионуклиды с атмосферными переносами преодолели расстояния в тысячи километров от Чернобыльской АЭС и в мае 1986 г. наблюдались во всех странах северного полушария, на акваториях Тихого, Атлантического и Северного Ледовитого океанов [5]. Самыми заметными из них были изотопы радиойода и радиоцезия.

Таблица 1. Оценки активности радионуклидов, выброшенных в окружающую среду вследствие Чернобыльской катастрофы в период аварии и 20 лет спустя [6]

Радионуклид	Период полураспада ($T_{1/2}$)	Активность выброса, ПБк	
		в период аварии	через 20 лет после аварии
Инертные газы			
^{85}Kr	10,77 л.	≈ 33	≈ 9.058000
^{133}Xe	5,25 д.	≈ 6500	< 0.000000
Легко летучие элементы			
^{131}Te	33,6 д.	≈ 240	<0.000000
^{132}Te	3,26 д.	≈ 1150	< 0.000000
^{131}I	8,02 д.	≈ 1760	< 0.000000
^{133}I	20,8 ч.	≈ 2500	<0.000000
^{134}Cs	2,06 л.	≈ 54	< 0.065000
^{136}Cs	13,16 д.	≈ 36	< 0.000000
^{137}Cs	30,17 л.	≈ 85	≈ 53.550000
Элементы с промежуточной летучестью			
^{89}Sr	50,5 д.	≈ 115	< 0.000000
^{90}Sr	29,12 л.	≈ 10	≈ 6.210000
^{103}Ru	39,3 д.	≈ 168	< 0.000000
^{106}Ru	368 д.	≈ 73	< 0.000077
^{140}Ba	12,7 д.	≈ 240	< 0.000000
Трудно летучие элементы			
^{95}Zr	64,0 д.	≈ 196	< 0.000000
^{99}Mo	2,75 д.	≈ 168	< 0.000000
^{141}Ce	32,5 д.	≈ 196	< 0.000000
^{144}Ce	284 д.	≈ 116	< 0.000002
^{239}Np	2,35 д.	≈ 400	< 0.000000
^{238}Pu	87,74 л.	≈ 0.035	< 0.030000
^{239}Pu	24110 л.	≈ 0.030	< 0.030000
^{240}Pu	6561 л.	≈ 0.042	< 0.042000
^{241}Pu	14,4 л.	≈ 6	< 2.292000
^{242}Pu	376000 л.	≈ 0.00004	< 0.000040
^{244}Cm	18,1 л.	≈ 0.9	< 0.419000
Общее загрязнение	≈ 13935,89593		<71.696119

Со временем активность радионуклидов, выброшенных в окружающую среду, существенно уменьшилась и уже через 20 лет после аварии основную радиологическую опасность представляли из ПЯД – ^{137}Cs и ^{90}Sr, из ТУЭ – ^{241}Pu, а также продукт его бета-распада – ^{241}Am [5, 7]. Следует отметить, что в момент

аварии америций в выбросах практически отсутствовал. Это единственный изотоп, количество которого со временем не уменьшается, а возрастает. В табл. 1 приведены активности основных радионуклидов чернобыльского происхождения в момент аварии и через 20 лет [6].

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что в период аварии более половины суммарной активности пришлась на долю инертных газов, которые, являясь β-излучателями, превращаются в стабильные изотопы: ^{85}Kr – в ^{85}Rb, ^{133}Xe – в ^{133}Cs. Наибольший вклад в радиоактивное загрязнение в первый период после аварии внесли изотопы ксенона, теллура, йода, цезия, рутения, бария, циркония. Все перечисленные радионуклиды, кроме ^{134,137}Cs, являются короткоживущими β-, или β-, γ-излучателями и в течение 2-3 лет переходят в стабильные изотопы. Цезий-134 с $T_{1/2}$=2,06 лет практически полностью переходит в стабильный ксенон-134 в течение 20 лет. И лишь цезий-137 продолжает оставаться активным до 300 лет. Графическое изображение вклада различных изотопов в радиоактивное загрязнение после аварии представлено на рис. 2 [7].

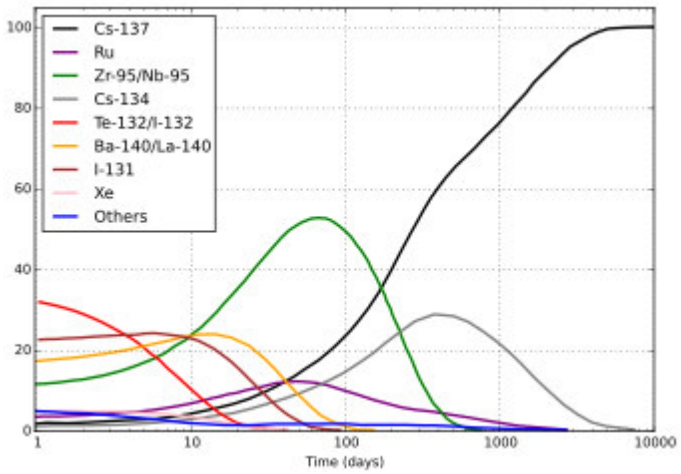


Рис. 2. Относительный вклад различных изотопов в радиоактивное загрязнение после аварии
Fig. 2. Relative contribution of various isotopes to radioactive contamination after an accident

Из всех ПЯД, содержащихся в выбросах, биологически значимыми и наиболее опасными для живых организмов являются: короткоживущий ^{131}I с периодом полураспада чуть больше 8 суток и представляющий наибольшую опасность для человека и животных в первый период после аварии, который так и называется «йодный», а также самые долгоживущие ПЯД ^{137}Cs – аналог калия и ^{90}Sr – аналог кальция, с периодами полураспада около 30 лет.

В апреле-мае 1986 г. основным радионуклидом, характеризующим радиационную обстановку на большинстве территорий, был ^{131}I, а критическим путем воздействия на территориях, где начался пастбищный выпас скота, стала молочная цепочка. «Йодный» период продлился 2,5 месяца.

Уже через 2-3 года активными оставались ^{85}Kr, ^{134}Cs, ^{137}Cs и небольшой вклад в активность вносили ^{95}Zr, ^{106}Ru и ^{144}Ce. Через двадцать лет после аварии основными дозоопределяющими изотопами, не считая инертного газа криптона, который рассеялся в атмосфере и не представлял радиационной опасности, стали ^{137}Cs ($T_{1/2}$ = 30,17 лет), ^{90}Sr ($T_{1/2}$ = 29,12 лет) и изотопы плутония. Причем, как будет сказано ниже, цезий, входя во все формы аварийных выбросов, распространился повсеместно, а стронций и плутоний выпали в ближней зоне аварии [2–7].

«Цезиевая» авария глобального масштаба. Одной из особенностей чернобыльской аварии, отличающей её от других крупнейших радиационных аварий в Европе и мире (Windckal, Англия,

1957; Кыштым, Урал, СССР, 1957; Trymail Ailend, США,1979; АЭС Фукусима-1, Япония, 2011), является большое содержание в радиоактивных выбросах изотопов цезия (^{134}Cs, ^{136}Cs, ^{137}Cs), которые находились как в газо-аэрозольных выбросах, так и в твердых макро- и микродисперсных формах. Так, характерной особенностью аварии в Уиндскейле являлся выброс в окружающую среду преимущественно ^{131}I. В Кыштымской аварии преобладающим нуклидом в загрязнении окружающей среды стал ^{90}Sr, что было обусловлено спецификой предприятия «Маяк», на котором произошел взрыв высокоактивных отходов после радиохимического извлечения плутония. И именно сопутствующее предварительное извлечение ^{l37}Cs в процессе обработки высокоактивных отходов производства плутония стало причиной низкой активности цезия в аварийных выбросах [8]. В чернобыльских выбросах количество ^{137}Cs было многократно выше, чем ^{90}Sr [2, 5]. Сравнительные данные по некоторым показателям для Кыштымской и Чернобыльской аварий приведены в табл. 2.

Таблица 2. Радиационно-физические характеристики аварий в Кыштыме и в Чернобыле

Показатель	Кыштым, 29.09.57 (осень)	Чернобыль, 26.04.86 (весна)
Выброс радионуклидов в окружающую среду, Ки	21 000 000	50 000 000
Площадь загрязнённых земель: – по ^{90}Sr, при плотности загрязнения >2 Ки/км^2 – по ^{137}Cs, при плотности загрязнения > 5 Ки/км^2	170 км^2	2000 км^2 30000 км^2
Время формирования первичного следа	11 часов	15–20 суток
Пространственное распределение радионуклидов	Равномерно убывает по оси следа, высокий градиент поперёк следа	Неравномерность распределения по площади и по формам нахождения
Радионуклидный состав выбросов	Через один год: ^{90}Sr ^{95}Zr,^{106}Ru,^{137}Cs,^{141}Ce, ^{144}Ce,^{147}Pm, Pu-следы	Основные ПЯД и ТУЭ на 10.05.86: ^{137}Cs,^{90}Sr,^{103,106}Ru,^{141,144}Ce, ^{140}Ba, $^{238\text{-}242}$Pu
Основные радиологически значимые радионуклиды	Все районы загрязнения: ^{90}Sr	Ближняя зона: ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{131}I, ^{140}Ba, ^{241}Pu, ^{241}Am Все районы: ^{137}Cs
Форма состояния радионуклидов в составе выброса	Растворимые нитратно-ацетатные соли	Ближняя зона: малорастворимые формы соединений (топливная матрица, «горячие» частицы); За пределы 30-км: растворимые формы (конденсационные); На дальние расстояния: газообразные и легколетучие изотопы

Выпадения в ближней к 4-му реактору ЧАЭС зоне включали в себя все разнообразие форм выпадений предыдущих аварий и, кроме того, имели свои специфические особенности. Так, в глобальных масштабах авария на ЧАЭС проявилась в загрязнении огромных территорий и акваторий летучими изотопами йода и цезия. Но уже через пару месяцев основным маркером повсеместного радиационного загрязнения стал, и ещё более 250 лет будет оставаться, ^{137}Cs.

Таким образом, цезий-137, поступающий в окружающую среду на протяжении всех трех активных стадий аварии, как в виде газо-аэрозольных выбросов, так и в виде твердых форм, стал повсеместно основным дозоопределяющим радионуклидом чернобыльского происхождения.

Во время фукусимской аварии в окружающую среду попали, в основном, летучие радиоактивные элементы, такие как изотопы йода и цезия, объём выброса которых составил примерно 20% от выброса этих изотопов при чернобыльской аварии, причем значительная часть этого выброса была унесена за прибрежную зону, осела и рассеялась в океане.

Формы и состав радиоактивных выбросов. Ещё одной характерной особенностью Чернобыльской аварии является наличие различных физических форм и состава выброшенных в окружающую среду веществ, которые содержали радионуклиды: крупноблочные обломки активной зоны, оборудование ядерного реактора, биологической защиты; газовая, паро-аэрозольная, аэрозольная смеси; топливные частички, минеральные частицы-носители с конденсированными на них радионуклидами; агломераты разных минеральных форм, органические соединения. Крупные радиоактивные фрагменты были сосредоточены на территории промплощадки 4-го блока ЧАЭС, которая была загрязнена разбросанными фрагментами активной зоны: обломками ТВЭЛ, блоками графитовой кладки, элементами конструкций. Микроблочные частицы топлива, состоящие из двуокиси урана UO_2, так называемые «горячие частицы», с адсорбированными на их поверхности осколочными ПЯД (рис. 2), а также тяжелые изотопы ТУЭ, распространились, в основном, вблизи разрушенного реактора, разлетевшись на расстояние до 100–200 км в виде различных микродисперсных частиц ядерного топлива, а также графитовой сажи [7]. Поэтому ещё одной особенностью аварии на ЧАЭС является неравномерность выпадений, обусловленная различными физико-химическими формами, радионуклидным составом и нахождением значительной части радионуклидов в составе малорастворимой топливной матрицы. «Горячие частицы» (см. рис. 3) в окружающей среде подвергаются абиотическим и биотическим процессам трансформации, ведущим к постепенному, иногда медленному переходу радиоактивных компонентов в растворимые формы и их последующей миграции в объектах окружающей среды.

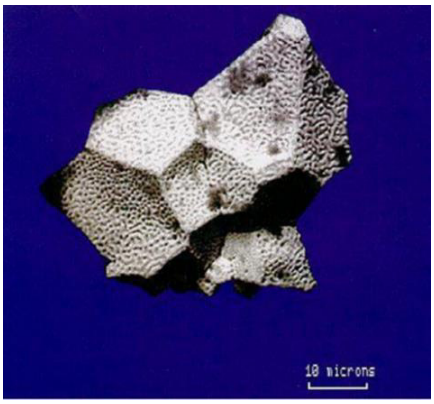


Рис. 3. Увеличенная фотография «горячей частицы» [6]
Fig. 3. Enlarged photo of the "hot particle" [6]

Наибольшие расстояния от ЧАЭС преодолели газообразные и легколетучие радионуклиды, такие как ^{103,106}Ru, ^{131,133}I, ^{132}Te, ^{134,137}Cs и радиоактивные инертные газы. ^{131}I и ^{137}Cs в составе газово-паро-аэрозольной смеси и частиц субмикронного размера, которые распространились на дальние расстояния, вызвав глобальное радиационное загрязнение окружающей среды.

Влияние метеоусловий на распространение радиоактивного облака. Все десять дней активной стадии аварии разрушенный реактор 4-го энергоблока ЧАЭС напоминал жерло действующего вулкана, из кратера которого в окружающую среду выбрасывались радионуклиды, распространяющиеся в различных слоях тропосферы на большие расстояния, направления которых зависели от метеоусловий. В докладе экспертной группы «Экология» Чернобыльского форума [2] приведена карта-схема распространения радиоактивных следов в зависимости от направления ветра с указанием сроков их формирования (рис. 4).

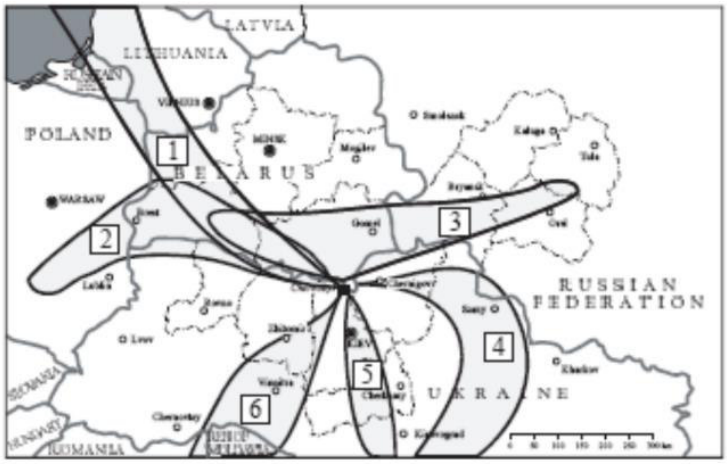


Рис. 4. Формирование радиоактивных следов в зависимости от метеоусловий:
1 – 26.04; 2 – 27.04; 3 – 27.04-28.04; 4 – 29.04-01.05; 5 – 02.05-03.05; 6 – 04.05-06.05
Fig. 4. Formation of radioactive traces depending on weather conditions:
1 – 26.04; 2 – 27.04; 3 – 27.04-28.04; 4 – 29.04-01.05; 5 – 02.05-03.05; 6 – 04.05-06.05

Поэтому пятнистый, мозаичный характер загрязнения территории европейских стран обусловлен метеоусловиями в период с 26 апреля по 6 мая, обусловленных направлением ветра и наличием осадков, а также ландшафтом местности, над которой проходило радиоактивное облако. Наибольшему радиационному загрязнению подверглись те территории, над которыми при прохождении радиоактивных атмосферных переносов выпадали осадки. Кроме того, имело место влияние рельефа земной поверхности: при прохождении радиоактивных облаков на малых высотах несколько большие радиоактивные выпадения наблюдались на возвышенных участках.

В табл. 3 приведены данные по количеству выпавшего цезия-137 (абсолютное и в %) в европейских странах [5], из которых следует, что наибольшему радиоактивному загрязнению подверглись Россия, Белоруссия и Украина, на территории которых выпало более 70% выброшенного цезия-137. Остальные европейские страны получили различные уровни загрязнений. Так, наибольшее количество выпадений наблюдалось в скандинавских странах, куда имел направление первый, самый мощный радиоактивный след. Из других стран более высокий уровень радиоактивного загрязнения пришелся на Австрию, Германию, Румынию, Грецию, тогда как в Польше, Словакии, Словении радиоактивных выпадений было меньше, несмотря на то, что эти страны расположены ближе к источнику аварии. Уровень загрязнения в 40 кБк/м^2 является нижней границей возможного воздействия на здоровье людей. Плотность загрязнения 1480 кБк/м^2 представляет границу зоны отселения населения.

На рис. 5 приведена карта из «Атласа загрязнения европейских стран цезием после Чернобыльской аварии» [5], на которой продемонстрирован мозаичный, неравномерный характер распределения радиационного загрязнения европейских стран цезием-137.

Последствия аварии и отчуждение радиационно загрязненных территорий. Чернобыльская авария является крупнейшей радиационной катастрофой, оказавшей влияние на население, окружающую среду, народнохозяйственную деятельность. Известно, что во время аварии погиб один человек, в последующие несколько недель – ещё 31 человек из числа пожарных, тушивших пожар на ЧАЭС, получивших высокие дозы радиации и умерших от острой лучевой болезни. В ликвидации последствий аварии в течение 1986–1989 гг. приняли участие более 600000 человек из разных республик и городов бывшего Советского Союза, из которых более трети были военнослужащими. Многие из ликви-

даторов первых двух лет ликвидации аварии получили высокие дозы облучения и впоследствии – статус инвалидов. Среди ликвидаторов наблюдается повышенная заболеваемость (сердечно-сосудистые заболевания, онкология, болезни органов дыхания, пищеварения и пр.) и смертность [9].

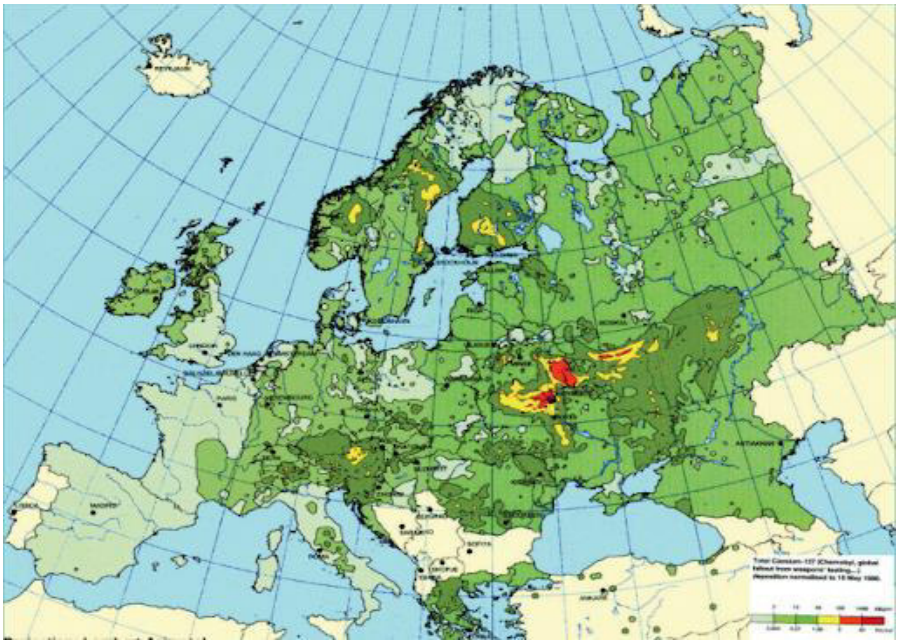


Рис. 5. Карта загрязнения европейских стран цезием-13
Fig. 5. Map of contamination of European countries with cesium-13

Таблица 3. Количество цезия-137 чернобыльского происхождения, выпавшего на территориях стран Европы, а также площади с повышенной плотностью загрязнения [6]

Страна	Суммарное количество, ПБк (кКи)	% от выпавшего количества	Площадь, тыс. км^2	
			>40 кБк/м^2	>1480 кБк/м^2
Австрия	1,6 (42)	2,4	11	
Белоруссия	**15 (400)**	**23**	**46**	**2,6**
Великобритания	0,52 (14)	0,83	0,16	
Германия	1,2 (32)	1,8	0,32	
Греция	0,69 (19)	1,1	1,2	
Италия (без Сицилии)	0,57 (15)	0,90	1,3	
Норвегия	2,0 (53)	3,1	7,1	
Польша	0,4 (11)	0,63	0,52	
Румыния	1,5 (41)	2,4	1,2	
Россия (Европейская часть)	**19 (520)**	**30**	**60**	**0,46**
Словакия	0,18 (4,7)	0,28	0,02	
Словения	0,33 (8,9)	0,52	0,61	
Финляндия	3,1 (83)	4,8	0,21	
Чехия	0,34 (9,3)	0,54	19	
Швеция	2,9 (79)	4,6	24	
Швейцария	0,27 (7,3)	0,73	0,73	
Украина	**12 (310)**	**18**	**38**	**0,54**

В результате аварии на Чернобыльской АЭС более 150 тыс. км^2 территории Белоруссии, России и Украины было отнесено к различным зонам радиоактивного загрязнения, в том числе:/ 48 тыс. км^2 – в Республике Беларусь, около 65 тыс. км^2 – на территории Российской Федерации и 53,5 тыс. км^2 – на территории Украины [10]. С наиболее загрязненных территорий было отселено население и прекращена или ограничена хозяйственная деятельность. Наибольшему радиационному загрязнению подверглась ближняя к 4-му реактору 30-км зона. Территория, на которой наблюдалась плотность загрязнения радиоцезием более 15,0 Ku/км^2 (555 кБк/м^2), радиостронцием более 3,0 Ku/км^2 (111 кБк/м^2) и плутонием более 0,1 Ku/км^2 (3,7 кБк/м^2) 4 мая 1986 г. преобразованная в Чернобыльскую зону отчуждения (ЧЗО) с прекращением народнохозяйственной деятельности. С радиационно-загрязненных территорий в 1986 г. было отселено 116 тыс. человек, а в последующем переселено на незагрязненные территории еще 230 тыс. человек [2]. Всего за период 1986–1991 гг. была прекращена или в значительной степени ограничена традиционная хозяйственная деятельность на больших территориях [10]:

– в Белоруссии на площади 264 000 га, в т.ч. 176 250 га за пределами территории зоны отчуждения, которая в 1988 г. была преобразована в Полесский государственный радиационно-экологический заповедник и исключена из использования;

– в Украине на площади 158 300 га, в т.ч. 101 300 га за пределами ЧЗО (30-км зоны), относящихся к зоне безусловного (обязательного) отселения;

– в России – на 17 100 га сельскохозяйственных угодий, отнесенных к зоне отчуждения.

На всех этапах ликвидации последствий аварии на ЧАЭС одним из ведущих направлений по возвращению пострадавших территорий к условиям нормальной жизнедеятельности являлись реабилитация агросферы и возвращение земель в хозяйственное использование.

«Сельская авария». Возвращение отчужденных земель. В результате чернобыльской аварии, получившей название «сельская авария», была загрязнена огромная территория бывшего Советского Союза, на которой располагались населенные пункты, природные (лесные, луговые, водные) экосистемы, сельскохозяйственные угодья. В коллективной работе, посвященной радиоэкологическим последствиям аварии [10] авторы приводят следующие обоснования названию чернобыльской аварии «сельской»: регион аварии относится к зоне интенсивного сельскохозяйственного производства, где аграрный сектор является одним из ведущих в экономике; основные загрязненные территории – это земли сельскохозяйственного назначения; потребление сельскохозяйственной продукции является одним из ведущих источников дополнительного облучения населения; основной контингент населения в зоне аварии – это люди, проживающие в сельской местности и имеющие «сельский» тип питания, что определяет более высокие дозы облучения сельских жителей по сравнению с горожанами.

На настоящем послеаварийном этапе основной задачей является возвращение территорий и населения к условиям нормальной жизнедеятельности [10, 11]. Критериями возможности использования таких территорий для ведения хозяйственной деятельности являются: дозовые нагрузки на население, плотность загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственных земель, лесов, населенных пунктов, а также возможность получения пищевой продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим требованиям [1, 10–14], что предусматривает проведение большого объема научных исследований, усовершенствование системы радиационного контроля и мониторинга, разработку технологии реабилитации загрязненных территорий и пр.

На радиационно загрязненных территориях уменьшение плотности загрязнений происходит вследствие автореабилитационных процессов (естественный распад, фиксация радионуклидов почвой, перераспределение в корнеобитаемом слое почв и т.п.) и принимаемых контрмер. Значительную роль в улучшении радиационной обстановки сыграло масштабное проведение реабилитационных мероприятий и защитных мер, таких как агротехнические (глубокая вспашка, сокращение междурядных обработок и др.), агрохимические (известкование почв, внесение калийных удобрений, использование природных минеральных сорбентов и др.), зооветеринарные (система содержания животных, подбор рациона, применение сорбентов), технологические (переработка загрязненного сельскохозяйственного сырья). Все это привело к существенному улучшению радиационной обстановки на территориях, пострадавших от аварии на ЧАЭС [2, 10, 11].

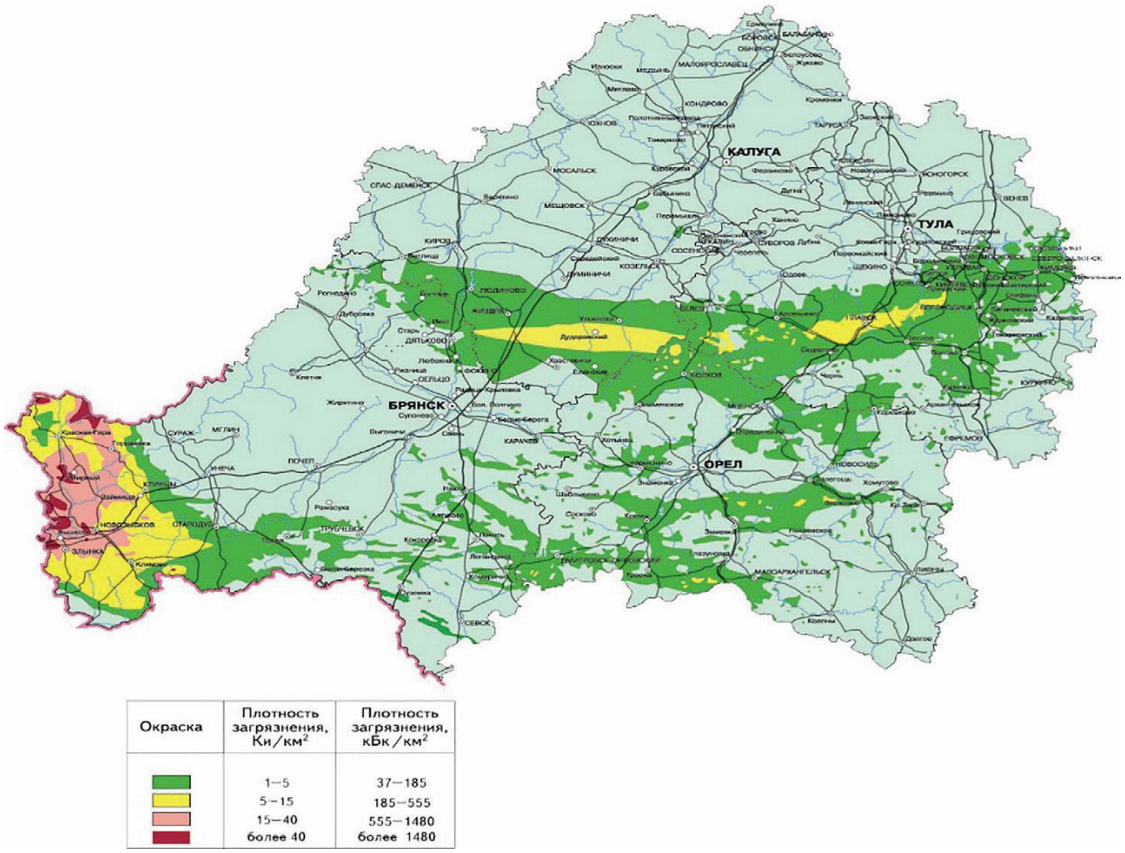


Рис. 6. Загрязнение сельскохозяйственных угодий цезием-137 в Брянской, Калужской, Тульской и Орловской областях Российской Федерации
Fig. 6. Contamination of agricultural lands with cesium-137 in the Bryansk, Kaluga, Tula and Oryol regions of the Russian Federation

В РФ в результате аварии на ЧАЭС 21 субъект Российской Федерации были загрязнены ^{137}Cs с уровнями, превышающими 37 кБк/м^2 (1 Ки/км^2), общая площадь такого загрязнения в 1986 г. составила 64,69 тыс. км^2 [10]. Наибольшему радиоактивному загрязнению подверглись 43 тыс. км^2 Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей (рис. 6) [1, 10].

Динамика уменьшения площади загрязнения за срок, соответствующий двум периодам полураспада ^{137}Cs (до 2046 г.) приведена в табл. 4.

Таблица 4. Прогноз изменения площадей с различными уровнями загрязнения ^{137}Cs в РФ, км^2 [11]

Год	Площади с различными уровнями загрязнения ^{137}Cs, кБк/м^2
1986	64 690
1996	56 520
2006	31 120
2016	22 550
2026	18 365
2036	15 330
2046	12 530

К 2016 г. площадь загрязнения уменьшилась примерно в 3 раза и составила 22,55 тыс. км^2, а к 2046 г. по прогнозу составит 12,53 тыс. км^2.

Максимальные плотности радиоактивных выпадений ^{137}Cs (свыше 1480 кБк/м^2) были выявлены в Брянской области, где 17,1 тыс. га сельскохозяйственных угодий были временно выведены из землепользования, из которых в настоящее время остаются с такой плотностью загрязнения 3,5 тыс. га. Их площадь к 2035 г. сократится в 7 раз и составит 509 га, а к 2060 г. на всех выведенных из оборота землях плотность загрязнения будет ниже 1480 кБк/м^2 [10].

В Белоруссии и в Украине доля выведенных из оборота сельскохозяйственных земель за 35 лет после аварии также значительно сократилась и продолжает сокращаться.

Однако возвращение загрязненных земель, на которых прекращена хозяйственная деятельность, в эксплуатацию затрудняется вследствие того, что на этих территориях разрушена инфраструктура (дороги, электроснабжение, мелиоративные системы и пр.); происходят процессы естественного залесения, заболачивания, деградации почвенного плодородия и т.п. Возвращению населения на эти территории препятствует отсутствие правового механизма законодательного изменения статуса радиационно загрязненных территорий, настороженность общественного мнения к использованию отчужденных территорий для производства потребительской продукции [10].

При возвращении отчужденных земель в хозяйственную деятельность перспективными направлениями их использования являются создание заповедников и заказников, лесопосадки, выращивание саженцев плодовых деревьев, семеноводство, коневодство, производство кормов для молодняка, добыча полезных ископаемых и т. д.

Проблема плутония и америция чернобыльского происхождения. Одной из актуальных постчернобыльских радиоэкологических проблем является проблема плутония и америция [15]. Загрязнению плутонием подверглись ЧЗО и близлежащие к 4-му энергоблоку ЧАЭС территории Украины, Белоруссии, а также западные районы Брянской области РФ.

Из пяти изотопов плутония $^{238\text{-}242}Pu$ лишь ^{241}Pu является β-излучателем с коротким периодом полураспада $T_{1/2}$=14,4 лет. Остальные радионуклиды плутония – α-излучатели с большими периодами полураспада, из которых самыми долгоживущими, а значит, и менее активными, являются ^{239}Pu и ^{242}Pu (см. табл. 1). На момент аварии и через 20 лет после неё наибольшей активностью из всех радионуклидов плутония обладал ^{241}Pu, несмотря на то, что в выбросах его было значительно меньше, чем ^{239}Pu. При β-распаде ^{241}Pu превращается в америций-241, являющийся долгоживущим α-излучателем:

$^{241}Pu \rightarrow$ (β-распад, $T_{1/2}$ = 14,4 года) $\rightarrow$ ^{241}Am (α-излучатель, $T_{1/2}$ = 432,6 года).

Поэтому одновременно с уменьшением количества ядер плутония-241 происходит увеличение ядер америция-241 [5, 14, 15]. С целью анализа динамики активности, оставшегося вследствие естественного распада ^{241}Pu и образовавшегося ^{241}Am, произведен расчет активности данных радионуклидов по прошествии 10, 20, 35, 40, 50, 60 и 70 лет после аварии. Полученные данные приведены в табл. 5.

Таблица 5. Оценка активности радионуклидов ^{241}Pu и ^{241}Am на момент аварии и спустя 10, 20, 35, 40, 50, 60 и 70 лет

Год	Активность ^{241}Pu (ПБк)	Активность ^{241}Am (ПБк)
1986	6,000	0
1996	3,708	0,076
2006	2,292	0,123
2021	1,113	0,163
2026	0,875	0,171
2036	0,541	0,182
2046	0,334	0,189
2056	0,207	0,193

Именно ^{241}Am представляет основную радиологическую опасность на загрязненных плутонием территориях. Это обусловлено физико-химическими свойствами соединений америция, которые обладают хорошей растворимостью. По сравнению с малорастворимыми и малоподвижными соединениями плутония, соединениям америция свойственна большая миграционная способность в экосистемах. И если плутоний опасен лишь при пероральном поступлении в организм, т.е. при заглатывании радиоактивных частиц, то америций способен накапливаться в вегетативных частях растений и по пищевым цепям с продуктами питания он может поступать в организм животных и человека, для которых он, являясь сверхтяжелым металлом, α-излучателем, представляет опасность с точки зрения радиационной токсикологии. Если учесть, что ^{241}Pu будет оставаться активным ещё более 100 лет, ^{137}Cs и ^{90}Sr – около 260 лет, то активность ^{241}Am будет проявляться более 4300 лет. Поэтому радиоэкологические проблемы загрязнения территории америцием чернобыльского происхождения будут актуальными для экосистем и многих поколений жителей, загрязненных плутонием территорий Украины, Белоруссии и России.

Заключение. На радиоэкологические последствия чернобыльской аварии повлияли её радиоэкологические особенности, такие как:

– сложный характер аварии, продолжительное время интенсивных выбросов, радиоактивное загрязнение огромных территорий;

– разнообразие форм и состава выпадений;

– изменение метеоусловий во время аварии;

– неравномерность выпадений по территории в макро-, мезо- и микромасштабах по физико-химическим формам, радионуклидному составу;

– пятнистый характер загрязнения территорий;

– масштабное загрязнение территории бывшего Советского Союза и сопредельных стран биологически значимым радионуклидом ^{137}Cs, который в течение длительного послеаварийного периода формирует основные дозовые нагрузки на человека;

– прекращение народнохозяйственной деятельности на наиболее радиационно-загрязненной цезием, стронцием и плутонием территории 30-км зоны вокруг 4-го энергоблока, которая была преобразована в зону отчуждения, выселение и переселение людей из этих территорий;

– «сельская авария» – загрязнение огромных территорий сельскохозяйственного назначения и прекращение или ограничение на них хозяйственной деятельности и проблемы возвращения этих территорий в эксплуатацию;

– радиоэкологические проблемы плутония и америция чернобыльского происхождения.

За прошедшие 35 лет после аварии на Чернобыльской АЭС площадь радиационно загрязненных территорий значительно сократилась вследствие естественных процессов распада, миграции радионуклидов в окружающей среде, а также контрмер, направленных на реабилитацию этих территорий. Анализ литературы, посвященной радиоэкологическим последствиям аварии на ЧАЭС, свидетельствует о том, что в процессе радиоэкологического мониторинга за автореабилитационными процессами и

реабилитационными мероприятиями на радиационно загрязненных территориях, накоплен большой научный и практический опыт, необходимый для обеспечения экологической безопасности экосистем и населения, проживающего на радиационно-загрязненных территориях, дальнейшего развития атомной энергетики.

Одно из ведущих мест в радиоэкологическом мониторинге радиационно загрязненных плутонием территорий должно отводиться наблюдению за возрастающей активностью америция и его миграцией в экосистемах, т.к. с естественным распадом ^{241}Pu количество более опасного для живых организмов ^{241}Am будет возрастать, и он будет активным в окружающей среде более 4300 лет.

В связи с радиоэкологическими особенностями формирования зоны отчуждения на радиационно загрязненных территориях возвращение этих земель в хозяйственное использование должно проводиться поэтапно с учетом радиационной обстановки и социально-экономических условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Российский* национальный доклад «35 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России 1986–2021» / под общей ред. Л.А. Большова. М.: Академ-Принт, 2021. 104 с.

2. *Экологические* последствия аварии на Чернобыльской АЭС и их преодоление. Двадцатилетний опыт: доклад экспертной группы «Экология» Чернобыльского форума. Вена: МАГАТЭ, 2008. 180 с.

3. *Двадцать* пять лет Чернобыльской катастрофы. Безопасность будущего. Киев: КІМ, 2011. 368 с.

4. 20 лет Чернобыльской катастрофы: Национальный доклад Украины. Киев: Чернобыльинтеринформ, 2006. 472 с.

5. *Израэль Ю.А.* Радиоактивное загрязнение природных сред в результате аварии на Чернобыльской атомной станции. М.: Изд-во «Комтехпринт», 2006. 28 с.

6. *Десять* лет после аварии на Чернобыльской АЭС: Национальный доклад Украины. Киев: Минчернобыль Украины, 1996. 250 с.

7. *Лукина Л.И., Моисеев Д.В*. Уроки Чернобыля // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 2(44). С. 106–118. DOI 10.33075/2220-5861-2021-2-106-118

8. *Романов Г.Н.* Кыштымская авария: секреты и мифы (западный анализ аварии 1957 г.) // Вопросы радиационной безопасности, 1997. № 3. С. 63–71.

9. *Иванов В.К., Цыб А.Ф., Иванов С.И.* Ликвидаторы чернобыльской катастрофы: радиационно-эпидемиологический анализ медицинских последствий. М.: Галанис, 1999. 312 с.

10. *Радиоэкологические* последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / под ред. чл.-корр. РАН Н.И. Санжаровой и проф. С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018. 278 с.

11. *Российский* национальный доклад «30 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России 1986–2016» / под общей ред. В.А. Пучкова и Л.А. Большова. М., 2016. 202 с.

12. *Радиоэкологическая* оценка сельскохозяйственных земель и продукции юго-западных районов Брянской области, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС / А.В. Панов, П.В. Прудников, И.Е. Титов [и др.] // Радиационная гигиена, 2019. Т. 12, № 1. С. 25–35.

13. *Российский* национальный доклад «25 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России 1986–2011» / под общей ред. С.К. Шойгу, Л.А. Большова. М., 2011. 160 с.

14. *Радиационно-гигиенические* аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. акад.

РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2016. Т. 1. 448 с.

15. *Экологические* проблемы плутония Чернобыльского происхождения / Л.И. Лукина, Д.В. Моисеев, П.А. Пономаренко [и др.] // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018: сборник статей по материалам междунар. науч.-практ. конференции, 2018. С. 735–738.

ANALYSIS OF RADIOECOLOGICAL FEATURES CHERNOBYL ACCIDENT

L.I. Lukina, D.V. Moiseev

Sevastopol State University,
Sevastopol, RF, Universitetskaya St., 33

The Chernobyl accident has become one of the largest man-made disasters with catastrophic radioecological, biomedical, socio-economic consequences. The article analyzes radioecological features of the Chernobyl accident, such as the dynamics of radioactive emissions, the composition and activity of radionuclides released into the environment, the ratio of radiocesium and radiostrontium, the forms and composition of radioactive emissions, the influence of weather conditions on the radioactive cloud spread, pollution of the 30-km zone and its transformation into an exclusion zone, auto-rehabilitation processes and rehabilitation measures for the return of alienated lands, the problem of plutonium and americium of Chernobyl origin.

Keywords: Chernobyl NPP, accident features, radionuclides, radiation contamination, radioecological consequences, radioecological monitoring.

REFERENCES

1. Rossijskij nacional'nyj doklad “35 let chernobyl'skoj avarii. Itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstvij v Rossii 1986–2021” (35 years of the Chernobyl accident. Results and prospects of overcoming its consequences in Russia 1986-2021), Moscow: Akadem-Print, 2021, 104 p.

2. Ekologicheskie posledstviya avarii na Chernobyl'skoj AES i ih preodolenie. Dvadcatiletnij opyt: doklad ekspertnoj gruppy “Ekologiya” Chernobyl'skogo foruma (Ekologicheskie posledstviya avarii or CHernobyl'skoj AES, ih preodolenie. Dvadcatiletnij opyt: doklad ekspertnoj gruppy “Ekologiya” Chernobyl'skogo foruma), Vena: MAGATE, 2008, 180 p.

3. Dvadcat' pyat' let Chernobyl'skoj katastrofy (Twenty-five years of the Chernobyl disaster). Bezopasnost' budushchego, Kiev: KIM, 2011, 368 p.

4. 20 let Chernobyl'skoj katastrofy: Nacional'nyj doklad Ukrainy (20 years of the Chernobyl disaster: The National Report of Ukraine), Kiev: Chernobyl'interinform, 2006, 472 p.

5. *Izrael' Yu.A.* Radioaktivnoe zagryaznenie prirodnyh sredstv v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoj atomnoj stancii (Radioactive contamination of natural resources as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant), Moscow: Izd-vo “Komtekhprint”, 2006, 28 p.

6. Desyat' let posle avarii na CHernobyl'skoj AES: Nacional'nyj doklad Ukrainy (Ten years after the Chernobyl accident: National Report of Ukraine), Kiev: Minchernobyl' Ukrainy, 1996, 250 p.

7. *Lukina L.I. and Moiseev D.V.* Uroki Chernobylya (Lessons of Chernobyl). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2021, No. 2(44), pp. 106–118. DOI 10.33075/2220-5861-2021-2-106-118

8. *Romanov G.N.* Kyshtymskaya avariya: sekrety i mify (zapadnyj analiz avarii 1957 g.) (Kyshtym accident: secrets and myths (Western analysis of the 1957 accident)). *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti*, 1997, No. 3, pp. 63–71.

9. *Ivanov V.K., Cyb A.F., and Ivanov S.I.* Likvidatory chernobyl'skoj katastrofy: radiacionno-epidemiologiche-skij analiz medicinskih posledstvij (Liquidators of the Chernobyl disaster: radiation-epidemiological analysis of medical consequences), Moscow: Galanis, 1999, 312 p.

10. Radioekologicheskie posledstviya avarii na Chernobyl'skoj AES: biologicheskie effekty, migraciya, reabilitaciya zagryaznennyh territorij (Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated territories), Moscow: RAN, 2018, 278 p.

11. Rossijskij nacional'nyj doklad “30 let chernobyl'skoj avarii. Itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstvij v Rossii 1986–2016” (Russian National report “30 years of the Chernobyl accident. Results and prospects of overcoming its consequences in Russia 1986-2016”), Moscow, 2016, 202 p.

12. *Panov A.V., Prudnikov P.V., Titov I.E., Krechetnikov V.V., Ratnikov A.N., and Shubina O.A.* Radioekologicheskaya ocenka sel'skohozyajstvennyh zemel' i produkcii yugo-zapadnyh rajonov Bryanskoj oblasti, zagryaznennyh radionuklidami v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoj AES (Radioecological assessment of agricultural land and production in South-Western districts of the Bryansk region contaminated with radionuclides as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant). *Radiacionnaya gigiena*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 25–35.

13. Rossijskij nacional'nyj doklad "25 let chernobyl'skoj avarii. Itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstvij v Rossii 1986–2011" (Russian national report, "25 years after the Chernobyl accident. The results and prospects of overcoming its consequences in Russia 1986-2011"), Moscow, 2011, 160 p.

14. Radiacionno-gigienicheskie aspekty preodoleniya posledstvij avarii na Chernobyl'skoj AES (Radiation-hygienic aspects of overcoming the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant), Saint-Petersburg: NIIRG im. prof. P.V. Ramzaeva, 2016, Vol. 1, 448 p.

15. *Lukina L.I., Moiseev D.V., Ponomarenko P.A., Frolova M.A., and Savranskij Yu.P.* Ekologicheskie problemy plutoniya Chernobyl'skogo proiskhozhdeniya (Environmental problems of plutonium from Chernobyl). *Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost' – 2018*: sbornik statej po materialam mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii, 2018, pp. 735–738.

УДК 620.1 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-43-48

ИНГИБИТОРЫ КИСЛОТНОЙ КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ АМИДОВ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ

А.С. Чернова, А.А. Исламутдинова, Э.К. Аминова, В.А. Идрисова

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Стертитамаке, РФ, Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, пр. Октября, 2
E-mail: k.elmira.k@yandex.ru

Разрушение оборудования нефтехимических производств от кислотной коррозии является одной из основных проблем, стоящих перед нефтеперерабатывающей промышленностью. Перспективным способом защиты конструкционной стали от кислотной коррозии является применение ингибиторов коррозии. В работе показана возможность использования в качестве ингибиторов кислотной коррозии амидов олеиновой кислоты, содержащих сульфогруппу, а также их солей. Исследуемые соединения получены путем трех последовательных синтезов, подобраны оптимальные условия для количественного получения целевых продуктов. Определены физико-химические характеристики полученных соединений.

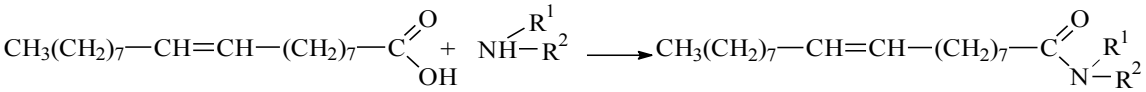
Ключевые слова: кислотная коррозия, ингибиторы, амиды, экологическая проблема, органический синтез, защитный эффект, антикоррозионные свойства.

Поступила в редакцию: 09.02.2022. После доработки: 14.03.2022.

Введение. Коррозия оборудования является одной из важнейших экологических проблем. Также потери от коррозии конструкционных материалов наносят существенный вред экономике региона и стране в целом. При утечке газа и нефти вследствие коррозионной порчи оборудования, значительно страдает окружающая среда. Ингибиторы коррозии позволят решить проблему разрушения металлоконструкций. Поверхностно активные вещества адсорбируются на границе металл-среда, тем самым образуя защитную пленку [1, 2]. Молекулы непредельных карбоновых кислот, в том числе и олеиновой кислоты, являются амфифильными. Это дает возможность таким соединениям проявлять поверхностную активность, а ингибирующие свойства повышает наличие таких элементов как азот, кислород и сера [3, 4]. Также азотсодержащие производные карбоновых кислот легко образуют соли, что делает такие соединения хорошо растворимыми в водных растворах [5, 6].

Материалы, методы и полученные результаты. Целевые соли с количественным выходом получены путем последовательного трехстадийного синтеза из олеиновой кислоты, и аминоспиртов (моноэтаноламин идиэтаноламин).

В качестве растворителя был взят *п*-ксилол. В качестве катализатора была использована 20 % серная кислота.



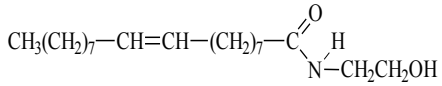
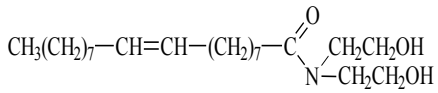
1а, б 2а, б

где $R^1 = CH_2CH_2OH$, R^2 (1а, 2а); R^1, $R^2 = (CH_2CH_2OH)_2$, (1б, 2б).

Для полученных соединений определены физико-химические показатели: кислотное и йодное числа.

Контроль, за ходом реакции, вели по рассчитанному количеству выделенной воды в ловушку Дина – Старка. По достижении максимального выхода, нагрев реакционной смеси прекращали и определяли кислотное число.

Таблица 1. Синтез амидов на основе олеиновой кислоты и этанол аминов

Исходные соединения		Продукты	Выход, %
A	B		
$C_{17}H_{33}COOH$	$NH_2CH_2CH_2OH$		90
	$NH(CH_2CH_2OH)_2$		94

Таким образом, из табл. 1 видно, что выход целевых амидов на основе диэтаноламином выше, чем с моноэтаноламином.

Таблица 2. Физико-химические показатели этаноламидов и сульфатированных этаноламидов олеиновой кислоты

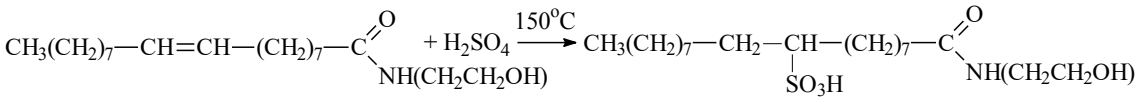
Соединение	Кислотное число КОН/г мг	Йодное число I_2/100г, г
Моноэтаноламид олеиновой кислоты	–	31,2
Сульфатированный моноэтаноламид олеиновой кислоты	164,2	–
Диэтаноламид олеиновой кислоты	–	56,4
Сульфатированный диэтаноламид олеиновой кислоты	176,0	–

Кислотное число амидов равно 0 мг КОН/г, что свидетельствует о полном замещении кислотной группы в исходной непредельной карбоновой кислоте. После реакции сульфирования кислотное число увеличивается, при этом йодное число равно 0 г I_2/100г, что говорит о полном раскрытии двойной связи в олеиновой кислоте. Поэтому можно сделать вывод, что в результате реакции сульфатирования происходит на разрыв связи C=C и образование сульфатированных амидов.

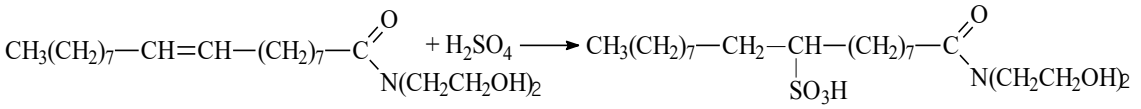
Для синтеза были использованы ранее полученные амиды олеиновой кислоты и амноспиртов (моноэтаноламина и диэтаноламида). Реакцию сульфирования проводили путём добавления к реакционной смеси 20%-го раствора серной кислоты при постоянном перемешивании и температуре 60°С в течение 15 часов. Мольное соотношение исходных соединений 1:1. Реакцию вели до

нейтральной среды. Выход целевого продукта составил 90% и 95% от теоретически возможного соответственно.

Сульфатирование проводили по схеме:

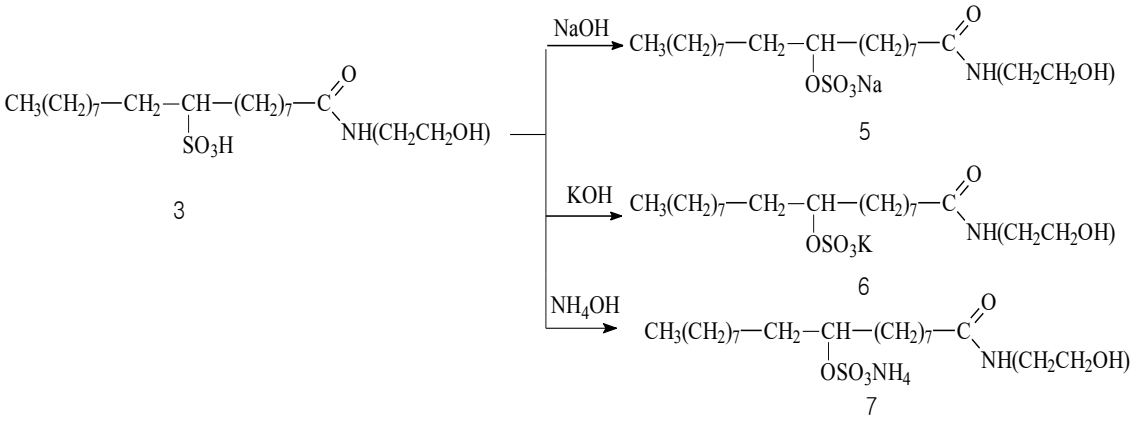


2а 3

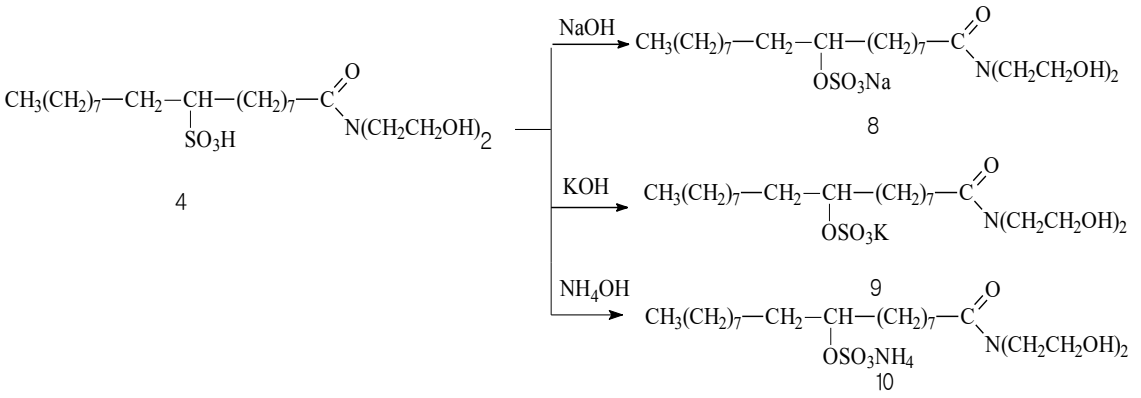


2б 4

Для получения солей были использованы ранее полученные сульфатированные амиды. К ним прибавляли 10, 20 и 30%-е водные растворы щелочей, таких как гидроксид натрия, гидроксид калия и гидроксид аммония. Синтез проводили при комнатной температуре с постоянным перемешиванием в течение 30 минут. Реакция получения солей амидов олеиновой кислоты, содержащих сульфогруппу представлена на схеме:



3 5 6 7



4 8 9 10

Выход полученных солей сульфатированных амидов олеиновой кислоты в зависимости от концентраций щелочных растворов представлен в табл. 3.

Таблица 3. Выход солей при синтезе с водными растворами щелочами разной концентрации

Исходные реагенты	Продукт	Концентрации растворов щелочей, %	Выход, %
Соединение 3 и NaOH	Соединение 5	10 20 40	84,1 97,0 97,5
Соединение 4 и NaOH	Соединение 8	10 20 40	86,3 96,4 96,8
Соединение 3 и KOH	Соединение 6	10 20 40	83,6 95,8 96,2
Соединение 4 и KOH	Соединение 9	10 20 40	84,6 95,4 95,4
Соединение 3 и NH_4OH	Соединение 7	10 20 40	81,6 93,2 94,0
Соединение 4 и NH_4OH	Соединение 10	10 20 40	82,4 92,1 93,0

По результатам, табл. 3 можно сделать вывод, что использование концентрации щелочи равной 10% недостаточно для полного выхода солей, а концентрация 40% нецелесообразна для их получения, так как незначительно влияет на выход целевых продуктов. Самой оптимальной концентрацией является концентрация, 20% при которой достигается высокий выход солей амидов, содержащих сульфатную группу.

В холе исследования для проверки на антикоррозионные свойства было получено два водорастворимых (3, 4) соединения и шесть водорастворимых (5–10) соединений. Антикоррозионные свойства потенциальных ингибиторов кислотной коррозии исследовали в статических условиях с концентрацией соляной кислоты 1 М при 20°С. Как следует, в более мягких условиях все полученные нами соли проявили высокую антикоррозионную активность. Поэтому представляло интерес оценить возможность использования данных солей в качестве потенциальных ингибиторов солянокислотной коррозии при травлении стали. Обычно, при травлении в стационарных ваннах для удаления окалины используют 15–20% растворы соляной кислоты. Так как соляная кислота обладает высокой летучестью температура травления обычно около 30–40°С.

Таблица 4. Защитная эффективность солей сульфатированных амидов олеиновой кислоты

Концентрация HCl, моль·л$^{-1}$	Соединение	Концентрация ингибитора, г·л$^{-1}$	Скорость коррозии, г·м$^{-2}$·ч$^{-1}$	Степень защиты, %
1,0	-	-	2,10	-
	3	0,1	0,2	90,0
	4	0,1	0,18	91,0
	5	0,1	0,12	94,3
	6	0,1	0,16	92,2
	7	0,1	0,12	94,3
	8	0,1	0,16	92,2
	9	0,1	0,14	93,5
	10	0,1	0,16	92,2
5,0	-	-	80,2	-
	3	0,1	5,6	93,0
	4	0,1	4,0	95,0
	5	0,1	35,56	55,6
	6	0,1	59,8	25,3
	7	0,1	56,1	29,6
	8	0,1	42,1	47,0
	9	0,1	58,9	24,2
	10	0,1	56,2	29,9

Из данных, представленных в табл. 4, можно сделать вывод, что при использовании 5М раствора соляной кислоты скорость коррозии незащищенных образцов стали значительно увеличилась. В этих условиях водорастворимые сульфатированные соли амидов олеиновой кислоты (5–10) проявили низкую защитную. Напротив, гидрофобные амиды олеиновой кислоты проявили хороший защитный эффект.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод, что в растворах с концентрацией соляной кислоты 1 М все полученные нами амиды и их соли проявляют высокую антикоррозионную активность. Сульфатированные амиды олеиновой кислоты в концентрации 0,1 г/л показывают высокий защитный эффект и в растворе с концентрацией соляной кислоты 5 М. Отсюда следует что сульфатированные амиды олеиновой кислот могут быть рекомендованы к использованию для защиты оборудования, в качестве потенциальных ингибиторов при травлении углеродистых сталей соляной кислотой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хаккерман К.Т., Макридес И.М.* Действие полярных органических ингибиторов при растворении металлов в кислотах. М.: Химия, 1966. 300 с.

2. *Рахманкулов Д.Л., Зенцов Н.В., Гафаров Н.А.* Ингибиторы коррозии. Т3. Основы производства отечественных ингибиторов коррозии. М.: Изд-во «Интер», 2005. 346 с.

3. *Борщевский А.М., Великанова Т.Д., Павловец Н.М.* Влияние железоокисляющих бактерий на коррозию углеродистой стали в водопроводной воде г. С-Петербурга // Защита металлов. 1994. Т. 30, № 4. С. 364–368.

4. *Гарифуллин Ф.С.* Исследование причин высоких скоростей коррозии трубопроводов // Нефтяное хозяйство. 2001. № 3. С. 64–66.

5. *Суербаев Х.А*. Введение в нефтехимию. Учебное пособие. Алматы: Казак университеті, 2002. 129 с.

6. *Химия* нефти / И.Ю. Батуева, А.А. Гайле, Ю.В. Поконова и др. Л.: Химия. 1984. 360 с.

ACID CORROSION INHIBITORS BASED ON OLEIC ACID AMIDES

A.S. Chernova, A.A. Islamutdinova, E.K. Aminova, V.A. Idrisova

Branch of the Ufa State Petroleum Technical University in Stertitamak
RF, Republic of Bashkortostan, Sterlitamak, October Av., 2

The destruction of petrochemical production equipment resulting from acid corrosion is one of the main problems faced by the oil refining industry. A promising way to protect structural steel from acid corrosion is the use of corrosion inhibitors. The paper shows the possibility of using oleic acid amides, containing a sulfogroup, as well as their salts as acid corrosion inhibitors. The studied compounds were obtained by three successive syntheses, optimal conditions for the quantitative production of target products were selected. The physicochemical characteristics of the obtained compounds were determined.
Keywords: acid corrosion, inhibitors, amides, environmental problem, organic synthesis, protective effect, anticorrosive properties.

REFERENCES

1. *Hakkerman K.T. and Makrides I.M.* Dejstvie poljarnyh organicheskih ingibitorov pri rastvorenii metallov v kislotah (The effect of polar organic inhibitors on the dissolution of metals in acids), Moscow: Himija, 1966, 300 p.

2. *Rahmankulov D.L., Zencov N.V., and Gafarov N.A.* Ingibitory korrozii. Vol. 3. Osnovy proizvodstva otechestvennyh ingibitorov korrozii (Fundamentals of the production of domestic corrosion inhibitors.), Moscow: Izdatel'stvo ”Inter”, 2005, 346 p.

3. *Borshhevskij A.M., Velikanova T.D., and Pavlovec N.M.* Vlijanie zhelezookisljajushhih bakterij na korroziju uglerodistoj stali v vodoprovodnoj vode S-Peterburg (Influence of iron-oxidizing bacteria on corrosion of carbon steel in tap water of St. Petersburg). *Zashhita metallov*, 1994, Vol. 30, No. 4, pp. 364–368.

4. *Garifullin F.S.* Issledovanie prichin vysokih skorostej korrozii truboprovodov (Investigation of the causes of high corrosion rates of pipelines). *Neftjanoe hozjajstvo*, 2001, No. 3, pp. 64–66.

5. *Suerbaev H.A.* Vvedenie v neftehimiju (Introduction to Petrochemistry), Almaty: Kazak universitet, 2002, 129 p.

6. *Batueva I.Ju., Gajle A.A., Pokonova Ju.V., Spirkin. V.G., and Chertkov Ja.B.* Himija nefti (Oil Chemistry.), Leningrad: Himija, 1984, 360 p.

УДК 532.529.5 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-49-55

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРОВОДЯНОГО ШЛЕЙФА ГРАДИРНИ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Л.И. Осадчая, Л.А. Ничкова, А.Р. Герасимов, Д.С. Шенин

Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: lila1809@mail.ru, nichkova@sevsu.ru

Проведены исследования трансформации пароводяных выбросов градирни в окружающей атмосферной среде в зависимости от метеорологических факторов. Выявлено, что структура пароводяного шлейфа является неоднородной. Выделено три зоны, в которых характер термоаэродинамических процессов и условий их течения существенно изменяются: зона активных аэродинамических процессов, переходная зона и зона факела. Установлено, что разбавление пароводяного шлейфа загрязненным воздухом осуществляется по всему объему за счет его турбулентности. Используя приведенные методические разработки, можно определить основные расчетные параметры пароводяного шлейфа градирни, в частности, температурный и влажностный режим.
Ключевые слова: градирня, пароводяной шлейф, термик, вихрь.

Поступила в редакцию: 04.03.2022. После доработки: 10.03.2022.

Введение. Среди проблем экологического плана наибольшее беспокойство вызывает нарастающее загрязнение воздушного бассейна примесями, имеющими техногенную природу. Основными источниками загрязнения являются предприятия энергетики, черной металлургии, химической промышленности, транспорта. Эти выбросы локализованы, как правило, в районах крупных городов и промышленных мегаполисов в концентрациях, опасных не только для биосферы, но и для техносферы, и составляющих ее неорганических материалов.

Одной из важнейших частей конструкций современных промышленных систем являются теплообменные устройства. Одним из элементов связи теплообменных систем с окружающей средой являются градирни, с помощью которых осуществляется удаление продуктов тепловыделения в окружающую среду с образованием пароводяных выбросов.

Выбросы влаги, как правило, безвредны при поступлении в чистую атмосферу. Однако в условиях промышленных комплексов увлажнение воздуха имеет нежелательные последствия за счет провоцирования в загрязненной атмосфере химических реакций, в результате которых зачастую происходит образование более опасных химических соединений.

В связи с этим исследование пароводяных выбросов градирни является актуальным.

Основная часть. Основными источниками пароводяных выбросов на современных предприятиях являются охлаждающие сооружения систем оборотного водоснабжения. Для организации охлаждения воды с помощью подводимого к ней атмосферного воздуха применяются водоохладительные сооружения следующих типов: открытые охладители – охлаждающие пруды, брызгальные бассейны, открытые брызгальные и капельные градирни; башенные охладители; капельные, пленочные и комбинированные (капельно-пленочные) градирни; вентиляторные градирни – брызгальные, капельные, пленочные и комбинированные капельно-пленочные; охладители со мешанной тягой; башенные вентиляторные градирни и вентиляторные комбинированные градирни [1, 2].

Развитие конструкций градирен шло, в основном, по пути модернизации отдельных систем, узлов, конструкций и их отдельных элементов, связанных с повышением эффективности работы, с улучшением аэродинамических характеристик, понижающих сопротивление движению газового потока в градирне.

Изменение конструкций касалось увеличения их надежности и долговечности работы, улучшения эксплуатационных характеристик во время работы, упрощения монтажа и демонтажа конструкций при их замене и ремонте. Башенные и вентиляторные градирни, как и другие виды охладительных устройств, рассмотренные выше, за последние десятилетия не претерпели изменений. Это либо усеченный конус, либо усеченный многогранник, и в редких случаях – криволинейная структура, чаще всего гиперболического вида. Направление движения контактирующих фаз встречное – в восходящем газовом потоке вниз падают капли жидкости.

Лучшими показателями по абсолютным величинам, определяющим эффективность работы градирни, обладают вентиляторные градирни с пленочно-капельным оросителем и подачей жидкости на ороситель сверху. Удельное орошение может достигать 18–20 $м^3/м^2$, глубина охлаждения – до 15ºС в летний период. Башенные градирни с оросителями имеют более низкие рабочие характеристики, но являются наиболее распространенным типом градирен.

Наиболее перспективным направлением в разработке новых конструкций водоохладителей в системе оборотного водоснабжения является переход к градирням без оросителей.

Основными конструктивными элементами таких градирен являются форсунки и брызгала. Качество работы форсунки характеризуется величиной диаметра капель, получающихся в результате дробления жидкости при встрече с газовым потоком на выходе из сопел форсунок, и их однородностью по гранулометрическому составу. Чем меньше размер капель воды и чем меньше их разброс по диаметру, тем выше качество распыла, тем эффективней работа градирни.

Другим важным фактором, обеспечивающим высокую эффективность работы градирни, является равномерность распределения капель жидкости по всему ее рабочему объему. Если изложенные выше требования к распылу и распределению жидкости выполнены, то можно ожидать максимального эффекта охлаждения. Конструкции устройств, разбрызгивающих и дробящих жидкость на капли, разнообразны и многочисленны, однако наиболее распространены только несколько видов гидравлических форсунок: струйные, центробежные, ударно-струйные, центробежно-струйные, форсунки с соударением струй, комбинированные [3, 4].

На распространение выбросов от градирен влияет множество факторов, ситуаций и условий. Анализ факторов, определяющих характеристики пароводяных выбросов градирен, позволил сгруппировать их в три основные группы: технологические, технические и метеорологические.

К технологическим факторам относятся: расход воды, поступающей в градирню, характер поля скоростей воздуха в градирне, тепловая нагрузка, концентрация загрязняющих веществ в охлаждающей воде.

К числу технических факторов относятся: тип градирни по способу организации тяги воздуха (башенные с естественной тягой, вентиляторные с принудительной тягой), тип и характеристика водораспределения в градирне (напорное и безнапорное); тип и характеристика водоразбрызгивающего устройства (форсунки); наличие и характеристики водоуловителя; геометрические и аэродинамические характеристики градирни.

Основными метеорологическими факторами являются: термодинамическое состояние атмосферного воздуха, характеристики ветра, временная изменчивость метеорологических параметров; сочетание метеорологических параметров в климатическом разрезе.

Рассмотрим поведение пароводяных выбросов градирни в окружающей атмосферной среде в зависимости от приведенных выше метеорологических факторов. Основной сложностью в данном вопросе является установление параметров пароводяного шлейфа. Под понятием «шлейф» подразумевается пространственное трассирование выбросов в течение времени. Данные понятия применимы в случае, когда речь идет о выбросах, их распределении в горизонтальных

и вертикальных координатах без учета особенностей процессов, происходящих внутри объема, занимаемого этими выбросами. На рис. 1 приведена структура пароводяного шлейфа, где выделено три зоны – зона активных термодинамических процессов, переходная зона, где интенсивность термодинамических процессов существенно снижается, и зона, которую можно рассматривать как обычный факел.

Факел представляет собой течение, обусловленное постоянным источником со сравнительно постоянными условиями его распространения. Как видно на рис. 1, зона факела начинается с сечения шлейфа, в котором термодинамические условия стабилизировались, подъемная сила минимальна, повышение температуры в факеле над окружающей средой убывает, а его распространение, в основном, зависит от направления, скорости ветра и условий турбулентности окружающей среды. Таким образом, состояние пароводяных выбросов определяется внешними факторами, а роль внутренних факторов сводится к минимуму. В некоторых случаях газообразные выбросы можно представить как струю в виде течения, проникающего в невозмущенную среду той же плотности, обладающее начальной скоростью в источнике. В этом случае роль внутренних факторов минимальна с момента поступления в окружающую среду.

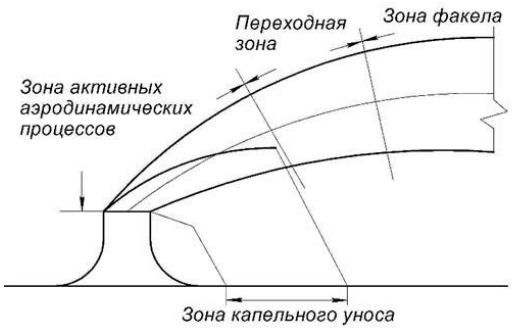


Рис. 1. Структура пароводяного шлейфа градирни
Fig. 1. Emission source location map

Первая зона – зона активных аэродинамических процессов представляет собой интенсивную турбулизированную теплую газообразную массу. Ее можно представить как поочередно образующиеся термики, источником которых является плоскость верхнего среза градирни. Термик представляет собой облако всплывшего газа, который при всплывании может перемешиваться с окружающим воздухом.

В атмосфере конвенция порождает очень сложные движения, для уяснения характера процесса рассмотрим поведение одного изолированного термика в невозмущенной среде. Исследования термиков, выполненные Скоррером, показывают, что они находятся в турбулентном движении [5]. Размеры термика увеличиваются по мере его движения по вертикали, а форма, в общем, остается прежней. Схема циркуляции термика представлена на рис. 2, где дано осевое сечение термика, на котором контур проведен в зоне безвихревого течения. В сечении показано течение воздуха относительно внешней границы термика. Термик показан неизменным по форме. Воздух по линии тока до 12º втягивается во фронтальную зону термика. Воздух находящийся между линиями тока 12º и 15º, втягивается в тыловую часть.

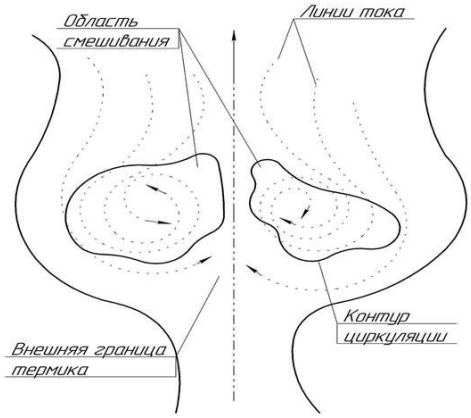


Рис. 2. Циркуляция газов внутри термика при его перемещении в невозмущенной воздушной среде
Fig. 2. Circulation of gases inside a thermal during its movement in undisturbed air

Воздух вне указанных линий тока не имеет своего характера движения. Первоначально термик представляет собой компактный объём тёплой воздушной смеси. Когда он поступает в воздушную

среду, его поверхность быстро вздувается множеством мелких протуберанцев, что происходит из-за статической неустойчивости. Но кольцевые вихри, образующиеся вокруг всплывающей массы паровоздушной смеси, помогают ему проникать в окружающий воздух и одновременно способствуют проникновению окружающего воздуха вдоль оси термика от заднего фронта к переднему, так что постепенно образуется тороидальный вихрь. Воздух, прошедший через осевую часть термика, становится турбулентным в области замедленного, расходящегося, криволинейного течения и перемешивается со всплывающими теплыми паровоздушными массами, разрывая всплывающую массу на отдельные вихри.

Таким образом, перед фронтом термика образуется турбулентное течение и частицы пыли и газа, находящиеся внутри конуса с половинным углом, равным 12º, смешиваются с фронтом термика. Другой конус с половинным углом при вершине 15º таков, что все частицы пыли и газа, оказавшиеся между его поверхностью и меньшим конусом, захватываются тыловой частью термика при его перемещении. Эти конусы нельзя считать постоянными, поскольку углы при вершине конусов меняются в зависимости от угла расширения самого термика.

За то время, пока термик поднимается на высоту, равную 1,5 его диаметра, он трансформируется, каждая его часть проходит через зону смешения и разбавляется. Если твердые частицы внутри термика обладают весьма малой собственной скоростью падения, то они будут оставаться в нем, так как окружающий воздух поддерживает их, поступая в термик снизу. Таким образом, каждый слой воздуха, сквозь который проникает термик, огибает термик и вовлекается в него. Поэтому, на пути, равном 2–3 диаметра термика, присоединившаяся порция загрязненного воздуха может быть размещена по всему термику (рис. 2).

Частицы, обладающие определенной скоростью падения, могут совершить несколько оборотов вокруг оси термика. В итоге, они выпадают из поля термика, когда скорость этого потока убывает. Скорость восходящего потока воздуха по оси термика в 2,2 раза выше, чем скорость поднятия самого термика. Наиболее интенсивно поднимающаяся масса воздуха имеет температуру намного более низкую, чем воздух термика.

Таким, образом, зона активных аэродинамических процессов, рассмотренная на примере одиночного термика, характеризуется интенсивным вовлечением в шлейф окружающего воздуха по всему своему объему.

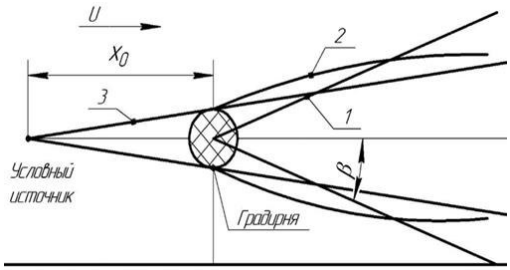
Движущей силой процессов первой зоны является разность температур выбрасываемого градирней воздуха и воздуха окружающей среды. По мере снижения температуры в сечении шлейфа происходит выравнивание с температурой окружающей среды, однако циркуляция воздуха в термике продолжается, но уже за счет инерционной составляющей образовавшихся вихревых процессов. Данный механизм наблюдается в переходной зоне шлейфа.

В дальнейшем по мере распространения шлейфа с течением времени циркуляционные процессы в шлейфе утихают и он приобретает характеристики влагонасыщенного факела. Таким образом, факел представляет собой течение воздуха в результате действия постоянного источника. Осесимметричный факел имеет постоянный поток влаги, в направлении вдоль оси он распространяется под действием ветровой нагрузки. Концентрация первоначальной влаги по мере удаления от источника изменяется за счет разбавления с окружающим воздухом через боковые поверхности. Внутреннее движение в факеле более упорядочено, однако факел нельзя представить как ламинарное движение, в большинстве случаев факелы являются турбулентными.

Обоснование параметров пароводяного шлейфа градирни. Объем воздуха, в который выбрасывается пароводяная смесь градирни, пропорционален скорости ветра U. Количество поступившей влаги определяется интенсивностью выброса Q. Примем, что количество влаги в единице объема шлейфа P прямо пропорционально интенсивности выброса Q и обратно пропорционально скорости ветра U.

Поскольку в воздушном потоке присутствуют вихри всех масштабов, то контуры шлейфа будут расширяться. Если предположить, что вихревая картина на территории постоянна и не изменяется с расстоянием от градирни, то можно сделать вывод, что вихрь будет производить одинаковое действие на всем протяжении его распространения, следовательно, свободный пароводяной шлейф будет распространяться вдоль геометрической фигуры, граничные формы которой приведены на рис. 3.

В случае большой активности аэродинамического состояния (при значительной разности между температурой выбросов и температурой окружающего атмосферного воздуха и малых скоростях ветра) шлейф имеет форму параболоида вращения. При незначительных разностях температур и высоких скоростях ветра форма шлейфа приближается к конусообразной. Для облегчения описания состояния факела, а также упрощения процесса нахождения расчетных характеристик параметров факела неудобный для расчета параболоид вращения заменяем конусом с вершиной, отнесенной в точку условного источника выбросов, находящейся на расстоянии x от точки истинного выброса (рис. 3).

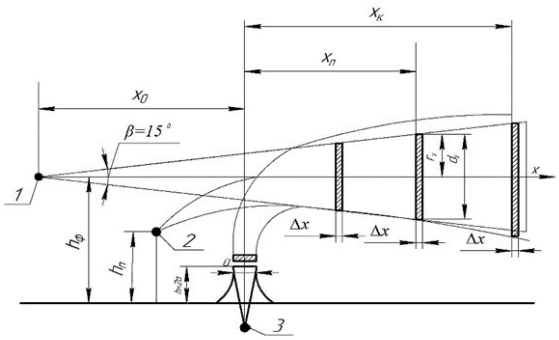


1 - конусообразный, 2 - параболический, 3 - принятый к расчету

Рис. 3. К обоснованию расчетных параметров факела
Fig. 3. To the justification of the calculated parameters of the flame

На рис. 4 учтены рассмотренные выше зоны аэродинамической трансформации пароводяного шлейфа. Таким образом, расчетная схема сводится к тому, что свободный пароводяной факел, в общем виде будет распространяться вдоль конуса, а картина процесса на расстоянии nh от источника будет такой же, как на расстоянии h (где h – высота градирни), но увеличенная в n раз.

Увеличение единичного объема Δx сечения конуса происходит за счет поступления окружающего атмосферного воздуха. Количество поступившего воздуха определяется диаметром конуса dx на расстоянии x от градирни. Концентрации влаги в единичном объеме обратно пропорциональна квадрату диаметра конуса dx^2.



1 – условный источник свободного факела, 2 – условный источник переходной части шлейфа, 3 – условный источник активной части шлейфа

Рис. 4. Схема для расчета коэффициента разбавления факела
Fig. 4. Scheme for calculating the flame dilution factor

Исходя из вышеизложенного, следует отметить, что основным фактором, определяющим состояние парогазовой смеси в факеле, является количество поступившего из окружающей среды в факел воздуха. Это количество можно выразить через коэффициент разбавления факела Kp, который является отношением объема факела единичной длины Δx в сечении x к начальному единичному объему при $x=0$ на уровне верхнего устья градирни, равном a (рис. 4), т.е. $Kp = f(x)$.

Для определения функции K_p исходим из формулы для определения коэффициента разбавления факела

$$K_p = \frac{\Delta V_x}{\Delta V_o}, \qquad (1)$$

где ΔV_o – начальный единичный объем истечения пароводяной смеси на уровне

верхнего устья градирни, м^3; ΔV_x – единичный объем пароводяного шлейфа на расстоянии x от градирни, м^3.

Для определения единичного объема ΔV_x, воспользуемся формулами:

$$\Delta V_x = \frac{\pi a^2 \Delta x}{4}, \quad (2)$$

$$\Delta V_x = \pi \times \Delta x[(x + 5a) \times tan\,\beta/2]^2, \quad (3)$$

где a – диаметр устья градирни, м; Δx – элементарное приращение по оси распространения факела градирни, м; β – параметр, зависящий от степени турбулентности факела и характеризующий расширение по мере его распространения по оси x, град.

Если принять параметры α и β постоянными, зависимость коэффициента разбавления K_p от дальности распространения факела определится в виде

$$K_p = \frac{4[(x+5a)\times tan(\beta/2)]^2}{a^2}. \quad (4)$$

На практике вместо диаметра выходного сечения (устья) градирни более удобно использовать ее высоту h. С достаточной для практических расчетов точностью можно принять, что $h = 2a$, тогда выражение (4) будет иметь вид

$$K_p = \frac{16(x+2.5a)^2\times tan^2(\beta/2)}{h^2}. \quad (5)$$

На рис. 5 приведена зависимость $K_p = f(x)$, где x – расстояние свободного ветрового перемещения, выраженное через высоту градирни параметром nh. Как следует из рисунка, коэффициент разбавления на расстоянии 50 - 60h (что соответствует 1 км) равен 1000 - 2000; на расстоянии 150 h (≈ 7,5 км) он достигает 5500 - 14000. При таком разбавлении шлейфа существенно изменяются его аэро- и термодинамические характеристики, что связано, прежде всего, с каплями воды, находящимися в пароводяном шлейфе.

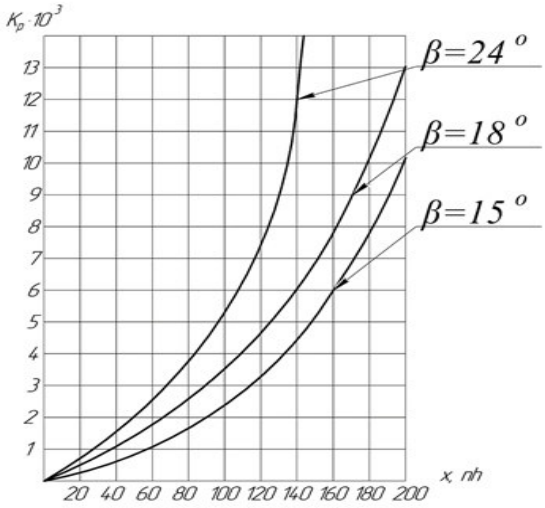


Рис. 5. Зависимость коэффициента разбавления факела от расстояния до источника
Fig. 5. Dependence of the flame dilution coefficient on the distance to the source

Заключение. Исследовав поведение пароводяных выбросов градирни в окружающей атмосферной среде в зависимости от метеорологических факторов пришли к следующему:

1. Структура пароводяного шлейфа выбросов градирни является неоднородной, в результате чего можно выделить три зоны, в которых характер термоаэродинамических процессов и условий их течения существенно изменяются: зона активных аэродинамических процессов, переходная зона и зона факела.

2. Разбавление пароводяного шлейфа загрязненным воздухом осуществляется по всему объему за счет его турбулентности. Интенсивность поступления в шлейф воздуха максимальна в зоне активных аэродинамических процессов, в зоне факела она уменьшается в два и более раза и при дальнейшем его распространении при стабильных метеорологических условиях не изменяется.

3. В процессе разбавления и распространения факела происходит снижение его температуры до величины на 0,8–1,2ºС ниже температуры окружающего атмосферного воздуха.

Таким образом, используя приведен-

ные выше методические разработки, можно определить основные расчетные параметры пароводяного шлейфа градирни, в частности, температурный и влажностный режим, для различных его участков по траекториям его распространения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пономаренко В.С., Ю.И. Арефьев.* Градирни промышленных и энергетических предприятий. М.: Энергоатомиздат. 1998. 376 с.

2. *Сосновский С.К., Кравченко В.П.* Определение эффективности охлаждения циркуляционной воды в вентиляторных и башенных градирнях // Энергетика и электрификация. 2008. № 3. С. 37–41.

3. *Сосновский С.К., Кравченко В.П.* Основные показатели эффективности работы градирен. Сб. статей Второй международной научно-практической конференции «Повышение безопасности и эффективности АЭС», Одесса, октябрь 2010. Одесса: НПЦ «Энергоатом», 2011. С. 102–109.

4. *Сосновский С.К., Кравченко В.П.* Каплеунос в вентиляторных градирнях // Энергетика и электрификация. 2001. № 9. С. 24–28.

5. *Скоррер Р.С.* Аэрогидродинамика окружающей среды. М: Мир, 1980. 349 с.

INVESTIGATION OF THE STEAM-WATER PLUME OF THE COOLING TOWER IN THE ENVIRONMENT

L.I. Osadchaya, L.A. Nichkova, A.R. Gerasimov, D.S. Shenin

Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

Studies of the transformation of steam-water emissions of a cooling tower in the ambient atmospheric environment, depending on meteorological factors, is carried out. It is revealed that the structure of the steam-water plume is heterogeneous. There are three zones in which the character of thermo-aerodynamic processes and their flow conditions change significantly: the zone of active aerodynamic processes, the transition zone, and the flare zone. It is established that dilution of the steam-water plume with polluted air is carried out throughout the volume due to its turbulence. Using the above methodological developments allows determining the main design parameters of the cooling tower steam-water plum, in particular, temperature and humidity conditions.

Keywords: cooling tower, steam-water plume, thermic, vortex.

REFERENCES

1. *Ponomarenko V.S. and Arefyev Yu.I.* Gradirni promyshlennyh i energeticheskih predpriyatij (Cooling towers of industrial and energy enterprises). Moscow: *Energoatomizdat,* 1998, 376 p.

2. *Sosnovsky S.K. and Kravchenko V.P.* Opredelenie effektivnosti ohlazhdeniya cirkulyacionnoj vody v ventilyatornyh i bashennyh gradirnyah (Determination of the cooling efficiency of circulating water in fan and tower cooling towers). *Energetika i elektrifikaciya,* 2008, No. 3, pp. 37–41.

3. *Sosnovsky S.K. and Kravchenko V.P.* Osnovnye pokazateli effektivnosti raboty gradiren (The main indicators of the efficiency of cooling towers). Sb. statej Vtoroj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii “Povyshenie bezopasnosti i effektivnosti AES” (The II International scientific and practical conference "Improving the safety and efficiency of nuclear power plants"), Odessa, October 2010, 2011, pp. 102–109.

4. *Sosnovskiy S.K. and Kravchenko V.P.* Kapleunos v ventilyatornyh gradirnyah (Cupleanos in fan cooling towers). *Energetika i elektrifikaciya,* 2001, No. 9, pp. 24–28.

5. *Scorrer R.S.* Aerogidrodinamika okruzhayushchej sredy (Aerohydrodynamics of the environment). Moscow: Mir, 1980, 349 p.

УДК 621.384 - 027.31 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-56-65

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОПЕРАТИВНОЙ ОКЕАНОЛОГИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ ОКЕАНСКОЙ ТОЛЩИ

Л.А. Краснодубец[1,2]

[1] Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
[2] Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: lakrasno@gmail.com

Представлены результаты исследования возможного применения для использования в оперативной океанологии предложенного автором базового метода вертикального профилирования океанской толщи как стратифицированной водной среды, обеспечивающего в реальном времени измерение плотности морской воды *in situ* как функции глубины. Метод помимо профилей плотности морской воды позволяет формировать массивы данных о распределениях полной и термохалинной вертикальной устойчивости слоёв водной массы и соответствующие профили частоты Вяйсяля-Брента термохалинных колебаний. Рассмотрены применения метода для построения алгоритмов умного профилирования, существенно сокращающих время проведения океанологических станций, а также алгоритмов синхронного профилирования. Исследованы вопросы оптимизации процессов динамических измерений. Приведены результаты компьютерного моделирования.
Ключевые слова: профилограф, стратификация океана, компьютерная модель, плотность морской воды, динамические измерения, частота Вяйсяля-Брента, вертикальная устойчивость.

Поступила в редакцию: 21.02.2022.

Введение. Новое направление океанологии – «оперативная океанология», предметом которой является получение диагностических и прогностических оценок состояния океана в режиме, близком к реальному времени [1], предполагает системное изучение природных параметров, создание систем комплексного измерения свойств водной толщи, систем оперативного сбора и передачи данных, а также ассимиляции новых данных в модели. Содержание нового направления океанологии «оперативная океанология» – комплексная оценка текущего состояния океанской среды и прогноз его изменчивости.

Статья посвящена исследованию различных применений метода динамических измерений вертикального профиля плотности морской воды [2] с помощью неуправляемых и управляемых автономных морских зондов – профилографов для получения диагностических оценок состояния океанской толщи в режиме, близком к реальному времени, а также разработке методов и систем оперативного сбора данных с морских автономных подвижных платформ.

Измерения с подвижных платформ сбора данных. Измерение называют динамическим, если нельзя пренебречь изменением величины во времени. К динамическим измерениям можно отнести измерения неизменяющихся во времени величин при помощи средств измерений, установленных на подвижных платформах сбора данных – ППСД (Mobile Data Collection Platform), которые в таком случае можно назвать системами динамических измерений – СДИ (Dynamic Measurement System).

На рис. 1 показана схема, иллюстрирующая применение ППСД при построении СДИ для решения задач оперативной океанологии.

ППСД разделяют на неуправляемые и управляемые, среди которых различают автономные и неавтономные.

Среди неуправляемых ППСД в настоящее время для исследования свойств водной толщи и, в частности, вертикальных профилей электропроводимости и температуры получили широкое распространение морские *CTD* зонды – профилографы, которые выпускаются большим числом производителей и имеют множество типов и модификаций.

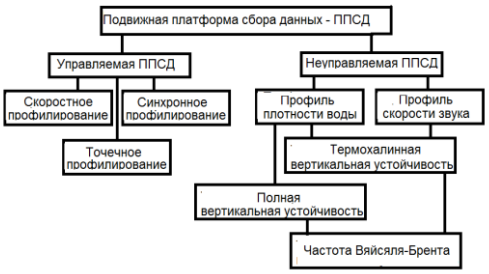


Рис. 1. Применения ППСД в задачах оперативной океанологии
Fig. 1. MDCP application in the tasks of operational oceanology

Управляемые ППСД, представляющие собой высокотехнологичные изделия, так же используются в качестве автономных морских *CTD* профилографов, оснащённых регуляторами плавучести, спутниковой связью и функцией программирования режимов вертикального движения как при погружении, так и при всплытии.

Процессы динамических измерений описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, правые части которых содержат измеряемый сигнал $x(t)$. Для восстановления измеряемого сигнала требуется решение обратной задачи динамики.

Динамическая погрешность при передаче сигнала $x(t)$ по измерительному каналу со статическим коэффициентом передачи k определяется по формуле

$$\Delta_{ДИН} = y(t) - kx(t) = y(t) - y_{CT},$$

где $y(t)$ сигнал на выходе канала СДИ; k – коэффициент передачи; y_{CT} – установившийся сигнал на выходе измерительного канала СДИ.

Динамические погрешности могут быть определены только расчетно-экспериментальным путем или в процессе компьютерного моделирования. Например, при помощи построения переходных характеристик для измерительных каналов с целью определения сигнала $y(t)$ как реакции на типовой сигнал $x(t)$.

Эталонов и образцовых средств в области динамических измерений нет.

Данные и методы. Операция определения вертикального профиля плотности морской воды согласно стандарту *WOCE* предусматривает измерение её *CTD* параметров (*CTD – conductivity, temperature, depth*), которые в результате последующей обработки приводят к вычислению абсолютной солености S_A, которая, в свою очередь, используется для определения плотности морской воды с помощью термодинамического уравнения состояния морской воды *TEOS*-10 [3]. Полученные таким путём вертикальные профили плотности морской воды как стратифицированной океанской среды могут использоваться для решения различных задач. Например, для определения характеристик стратификации океанской среды – вертикальной устойчивости образующих её водных масс и параметров термохалинных колебаний требуются прямые измерения *in situ* плотности морской воды и её приращения как функций гидростатического давления, а также градиента плотности по давлению [4]. Однако, такой подход к определению параметров стратификации для оперативной океанологии мало пригоден из-за многоступенчатой процедуры вычисления плотности по данным *CTD* измерений, которая выполняется, как правило, после эксперимента, проводимого во время океанологической станции.

Для оперативного измерения *in situ* вертикального распределения плотности морской воды в океанской среде предложен метод динамических измерений вертикального профиля плотности морской воды *in situ* с помощью ныряющего автономного морского зонда – профилографа [2]. При этом вычисление плотности морской воды и её приращения производится по данным траекторных измерений, выполняемых бортовой навигационной системой. Эти данные усваиваются математической моделью процесса профилирования, устанавливающей динамическую связь между плотностью окружающей морской воды и траекторными параметрами вертикального движения в этой воде погружаемого ав-

тономного зонда с известными массогабаритными характеристиками. Использование такой модели даёт возможность поставить обратную задачу динамики, решение которой приводит к построению алгоритмической структуры информационной системы, обеспечивающей в ходе погружения неуправляемого автономного зонда определение вертикального профиля плотности морской воды и ее приращения в зависимости от глубины (давления), а также градиента плотности по давлению [2].

Научной основой этого метода служит математическое описание процесса динамического измерения плотности морской воды и её приращения по глубине (давлению) в форме дифференциального уравнения, описывающего вертикальное движение в стратифицированной океанской среде корпусной части автономного морского зонда с известными формой и размерами, в следующем виде [2]

$$\ddot{z}(t) = -a\dot{z}(t)\left|\dot{z}(t)\right| + f_p(z),\ t \in [t_0, t_f], \quad (1)$$

где

$$a = \frac{C_x S_m}{2V},\ f_p(z) = \left[1 - \frac{\Delta\rho(z)}{\rho^0}\right] g \quad (2)$$

с начальными условиями:

$$t_0 = 0;\quad z(t_0) = z_0;\quad \dot{z}(t_0) = \dot{z}_0, \quad (3)$$

где C_x, S_m, V – конструктивные параметры корпусной части морского зонда; $\Delta\rho_в(z)$ – приращение плотности морской воды как функция глубины z; g – ускорение свободного падения; ρ^0 – плотность морской воды в поверхностном слое.

Особенность уравнения (1) заключается в том, что возмущающая функция, стоящая в правой его части, зависит от приращения плотности окружающей зонд морской воды. Это даёт возможность определить базовый метод динамических измерений вертикального профиля океанской толщи путём постановки и решения обратной задачи динамики – по данным текущих измерений траекторных параметров вертикального движения корпусной части морского зонда в стратифицированной воде определить приращение её плотности как функции глубины, а также построить вертикальный профиль соответствующего распределения результатов измерений плотности морской воды *in situ* с учётом начальных условий.

Выражения, определяющие искомую плотность и её приращение как функции глубины, в соответствии с базовым методом имеют следующий вид:

$$\rho(z) = \rho^0\{2 - \frac{1}{g}[\ddot{z}(t) + a\dot{z}(t)^2]\}, \quad (4)$$

$$\Delta\rho(z) = -\frac{\rho^0}{g}[\ddot{z}(t) + a\dot{z}(t)^2 - g]. \quad (5)$$

Принимая начальные условия (3) вместе с известными параметрами ρ^0 и a за исходные данные, а функции $\ddot{z}(t)$ и $\dot{z}(t)$, входящие в правую часть уравнения (4) доступными для измерения (соответственно вертикальные составляющие ускорения и скорости погружения), можно вычислять текущую глубину $z(t)$ и соответствующую ей плотность морской воды $\rho(z)$, которую путем перемножения с известной константой ρ^0 можно преобразовать в искомую плотность $\rho(z)$.

Таким образом, для решения задачи построения вертикального профиля плотности морской воды за время профилирования требуются данные о текущих значениях глубины, а также вертикальных составляющих скорости и ускорения процесса погружения зонда. Эти данные могут быть получены двумя способами: прямым измерением при помощи акселерометра или косвенным путем дифференцирования прямых измерений гидростатического давления.

С помощью выражения (5) с соответствующими начальными условиями можно вычислять изменение плотности морской воды в зависимости от глубины. Если приращение плотности требуется вычислить как функцию давления, то можно воспользоваться основным уравнением гидростатики, в соответствии с

которым

$$p = p_0 + \rho g z, \qquad (6)$$

где p и ρ – гидростатическое давление и плотность морской воды, соответствующие глубине z; p_0 – давление атмосферы на океанскую поверхность; g – ускорение свободного падения.

Динамические измерения характеристик стратификации океана. Условия вертикальной стратификации морской воды характеризуются термохалинной устойчивостью – параметром, который в соответствии с методом Т. Хессельберга и Х. Свердрупа [4] выражается через градиенты солёности и температуры *in situ* по давлению окружающей среды, которые в соответствии со стандартом *WOCE* формируются по данным профильных измерений *CTD* параметров океанской среды. Подобные вычисления, как правило, выполняются после завершения эксперимента по профилированию. Поэтому для решения задач оперативной океанологии нужно искать и разрабатывать новые методы, обеспечивающие в режиме реального времени получение характеристик стратификации океанской толщи.

Как было показано, базовый метод [2] профилирования позволяет построить вертикальный профиль плотности морской воды как функцию давления, а также градиент плотности по давлению практически в реальном времени. Это даёт возможность вычислять полную вертикальную устойчивость по формуле [4]

$$E = g\frac{d\rho}{dp}. \qquad (7)$$

В соответствии с алгоритмом, следующим из выражений (4)–(6), можно выполнить построение вертикального профиля плотности морской воды, а также её приращения как функций давления в ходе процесса погружения зонда (то есть в реальном масштабе времени) по текущим измерениям траекторных параметров его вертикального движения, поступающих от бортовой навигационной системы. При этом параллельно можно вычислять градиент плотности по давлению, что даёт возможность по формуле (7) рассчитать полную вертикальную устойчивость – E, а с её помощью вычислить частоту Вяйсяля-Брента – N и соответствующий ей период – T термохалинных колебаний, вызванных вертикальным перемещением водной массы

$$N^2 = gE, \quad T = 2\pi / N.$$

Известен метод М. Поллака, который основан на представлении зависимости адиабатического градиента плотности от скорости звука. В таком случае выражение для термохалинной устойчивости имеет следующий вид [4, 5]:

$$E_{\theta,S} = g\left[\frac{d\rho}{dp} - \frac{1}{C^2}\right], \qquad (8)$$

где C – скорость звука в морской воде на текущей глубине и соответствующих этой глубине статическом давлении и плотности морской воды.

Таким образом, введение в структуру СДИ характеристик стратификации океанской среды параллельного канала измерения скорости звука в морской воде позволяет дополнительно строить в реальном времени (параллельно с основным каналом плотности) не только вертикальное распределение скоростей звука в стратифицированной морской среде, но также строить распределение термохалинной вертикальной устойчивости в соответствии с методом М. Поллака.

На рис. 2 показана структура СДИ, предназначенной для оперативной оценки стратификации океанской среды.

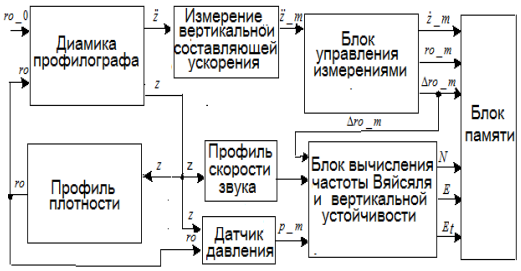


Рис. 2. Структура СДИ
Fig. 2. The structure of a DMS

На рис. 3 приведен график вертикального профиля плотности морской воды, полученный на океанологической станции в Чёрном море.

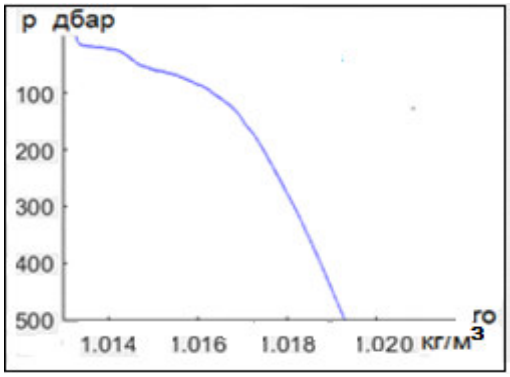


Рис. 3. Профиль плотности морской воды
Fig. 3. Seawater density profile

Программно-алгоритмическая структура, изображённая на рис. 2, предназначена для компьютерного моделирования СДИ, работающей в реальном времени. Однако, её можно с успехом использовать для построения характеристик стратификации океанской среды с помощью архивных файлов, содержащих оцифрованные данные вертикальных профилей плотности морской воды и хранящихся в базах данных вместе с тегами о дате, времени и месте состоявшихся океанологических станций. На рис. 4 приведен график распределения полной вертикальной устойчивости слоёв водных масс по данным профиля, изображённого на рис. 3.

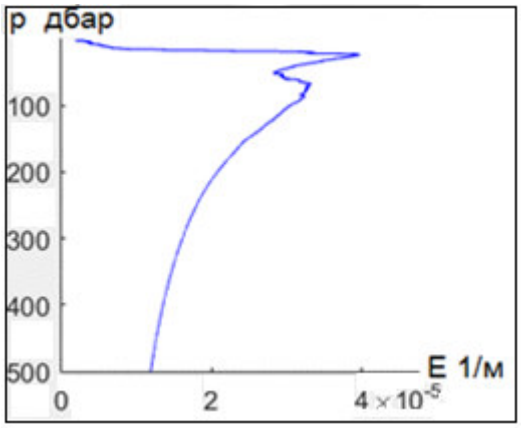


Рис. 4. Вертикальная устойчивость
Fig. 4. Vertical stability

На рис. 5 приведен график распределения частоты термохалинных колебаний Вяйсяля-Брента, который построен по данным вертикальной устойчивости.

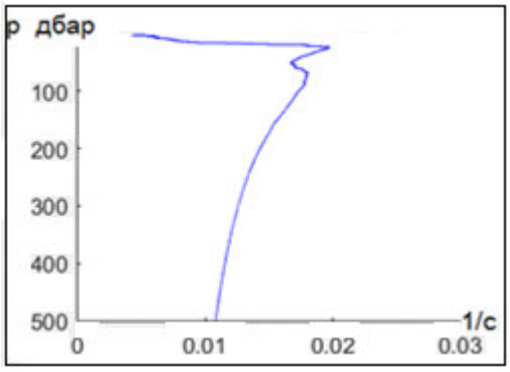


Рис. 5. Распределение частоты Вяйсяля-Брента
Fig. 5. Väisälä-Brent frequency distribution

Как следует из вышеизложенного, для построения вертикального профиля плотности морской воды, с помощью предложенной СДИ, не требуется выполнять измерения её температуры. Однако, при необходимости канал измерения температуры можно включить в состав структуры СДИ и тем самым обеспечить построение вертикального профиля температуры параллельно с другими профилями.

Повышение точности динамических измерений. Применение подвижных платформ сбора данных для транспортировки инерционных датчиков, входящих в СДИ, накладывает ограничения на выбор скоростных режимов погружения зонда, скорость которого должна выбираться (при проектировании корпусной части или с помощью регулятора плавучести) с учётом допустимых динамических ошибок, вызываемых инерционными свойствами измерителей параметров окружающей среды, а также вертикальных составляющих ускорения $\ddot{z}(t)$ и скорости $\dot{z}(t)$.

Для снижения таких ошибок рассчитывают допустимые скорости перемещения подвижных платформ, исходя из постоянных времени, используемых датчиков и погрешности измерений.

Программой *WOCE* установлено, что погрешность измерения температуры

морской воды не должна превышать $\Delta t = 0{,}002^{\circ}\mathrm{C}$. При использовании на зонде-профилографе датчиков температуры фирмы *SBE* постоянная времени датчика оценивается величиной $\theta_t = 0{,}065\,c$. В работе [6] показано, что в таком случае динамическая погрешность измерения температуры не превысит значения $(\Delta t)_{дин} \le (\Delta t)_{стат} = 0{,}0012^{o}C$ в слое максимального градиента температуры, если скорость вертикального движения профилографа не превысит значения

$$V_{доп} \le (0{,}24...0{,}05)\,м/с\,. \qquad (9)$$

При использовании критерия (9) скорость вертикального движения профилографа должна определяться по скорости изменения давления в единицах децибар (дбар), а текущий градиент температуры должен вычисляться по данным получаемой информации непосредственно с помощью бортового микроконтроллера СДИ.

Оптимизация процессов динамических измерений. Построение вертикального профиля плотности морской воды при помощи базового метода основано на использовании текущих данных бортовой навигационной системы морского автономного неуправляемого профилографа, которые формируются быстродействующими акселерометрами и обрабатываются микроконтроллером. При этом данные измерений траекторных параметров передаются в специальную цифровую модель, построенную по соотношениям (4) и (5). В роли параметра этой модели используется величина, зависящая от массогабаритных характеристик корпусной части профилографа. В реальных условиях динамика процесса измерений отличается от его модели и возникает задача минимизации этого отклонения в ходе процедуры определения плотности и ее приращения в зависимости от глубины. Кроме этого цифровое моделирование системы (4) и (5) с учетом квантования данных траекторных измерений показало, что в измерительной системе могут возникать шумы квантования в результате аналого-цифрового преобразования, существенно влияющие на точность выполняемых измерений.

Для снижения влияния указанных факторов на процесс динамических измерений, а также механических возмущений, действующих на корпусную часть зонда, ставится задача минимизации отклонения текущих измерений вертикальной составляющей ускорения зонда от соответствующего значения ускорения, формируемого цифровой моделью эталонного процесса измерений, определяемого уравнением (4).

Решение этой задачи предложено искать методом локальной оптимизации, то есть такой оптимизации, которая выполняется в реальном времени в процессе определения искомого вертикального профиля плотности морской воды, а также ее приращения.

Таким образом, ставится оптимизационная задача: найти такое значение плотности морской воды ρ, при котором будет обеспечен минимум отклонения фазовых траекторий текущего процесса измерений от соответствующих траекторий модельного процесса, формирующего искомый вертикальный профиль.

Если принять за меру отклонения математической модели измерений от реального процесса в приборной системе квадратичный критерий в форме функционала, содержащего квадрат разности ускорений профилографа и соответствующей координаты модельного процесса, то критерий оптимизации примет вид

$$G(\rho) = \frac{1}{2}\left[\dot{v}_{изм} - \dot{v}(\rho)\right]^2, \qquad (10)$$

где $\dot{v}_{изм} = \ddot{z}_{изм}$ – ускорение, измеренное навигационной системой; $\dot{v}(\rho) = \ddot{z}(\rho)$ – модельное ускорение.

Далее можно при заданных ограничениях на измеряемые навигационной системой параметры найти выражение для плотности морской воды ρ из усло-

вия $G(\rho) = \min$ градиентным методом скоростного спуска, которое имеет вид

$$\frac{d\rho}{dt} = -\lambda \frac{g}{\rho^0}\left[\dot{v}_{изм} + av^2 - 2g + \rho\frac{g}{\rho^0}\right], \quad (11)$$
$$t = t_0; \rho(t_0) = \rho^0; v(t_0) = 0; t \geq 0,$$

где a – конструктивный параметр; ρ – текущее значение плотности; ρ^0 – плотность морской воды в поверхностном слое; g – ускорение свободного падения на широте океанологической станции; λ – константа, подлежащая определению. Она характеризует скорость, с которой текущее значение вычисляемой плотности $\rho(t)$ приближается к оптимальному значению ρ_{opt}.

Дифференциальное уравнение (11) формирует текущую плотность морской воды как результат оптимального процесса динамических измерений вертикального профиля океанской толщи по текущим данным, поступающим от бортовой навигационной системы, о вертикальной составляющей ускорения и скорости движения корпусной части автономного морского зонда в стратифицированной среде.

Применение управляемых ППСД для динамических измерений. Оснащение ППСД системой управления открывает новые возможности расширения измерительной базы для решения задач оперативной океанологии. В частности, для исследований океанской толщи в настоящее время применяются морские автономные профилографы класса *Argo*, построенные на основе морских ныряющих буёв-дрифтеров с регулируемой плавучестью, которые оснащены системой управления и спутниковой связью. Основное назначение таких управляемых ППСД – формирование вертикальных профилей *CTD* параметров до глубин 6000 м [7]. Профилографы *Argo*, флот которых на момент написания статьи насчитывает порядка 4000 буёв, с океанской поверхности погружаются на заданный программой глубинный горизонт, где находятся в свободном дрейфе 10 суток. За время подъёма на поверхность океана со скоростью 9,5 см/с (примерно сутки с глубины 6000 м) бортовая измерительная система формирует профиль *CTD* параметров в виде массива данных, который после всплытия попадает по спутниковому каналу связи в сеть *Internet* и распределяется потребителям, где массивы *CTD* данных обрабатываются в лабораторных условиях с целью вычисления вертикального распределения плотности морской воды, необходимого для построения распределений характеристик стратификации океанской среды.

Каждый профилограф *Argo* пополняет базу данных профилей регулярно через 10 суток. По этой причине, а также в связи с тем, что «поплавки» *Argo* распределены по всем океанам и непрерывно находятся в свободном дрейфе, поставляемые данные в рамках глобальной программы *Argo* для нужд оперативной океанологии малопригодны. Применение «поплавков» *Argo* вне действующей сети в автономном режиме так же не имеет смысла из-за малой скорости вертикального профилирования, среднее значение которой примерно соответствует 0,1 м/с, что хорошо согласуется с критерием (9) и практически исключает динамические искажения при измерении *CTD* параметров, вызванные инерционными свойствами датчиков. Важно отметить, что при такой скоростной режим для регистрации термохалинных профилей океанской толщи до 6000 м может привести к искажению результатов измерений из-за временной и пространственной изменчивости океанской среды. При этом необходимо учитывать затраты на содержание судна и экипажа, выполняющего океанологическую станцию по определению профиля.

Система управления профилографа *Argo* за счёт автоматической стабилизации скоростного режима вертикального профилирования, соответствующего критерию (9), не допускает в его измерительных каналах возникновения режима динамических измерений. Превышение предельной скорости профилирования приводит к существенному росту дина-

мических искажений, что можно рассматривать как переход в режим динамических измерений. При этом для снижения динамических искажений данных требуется дополнительная обработка массива измерений, которая выполняется в лабораторных условиях после завершения эксперимента.

Таким образом, сокращение времени вертикального профилирования является актуальным для успешного решения задач оперативной океанологии, связанных с исследованиями океанской толщи.

Скоростное профилирование. Допустимая скорость неуправляемого профилографа, определяемая критерием (9), зависит от значения постоянной времени температурного датчика. Если решается задача определения вертикального профиля только плотности морской воды, то, исключая канал температуры и применяя метод [2], допустимую максимальную скорость профилирования можно будет увеличить на порядок.

Снижение времени на выполнение операций профилирования, выполняемых путём измерений *CTD* параметров океанской среды при помощи автономного морского профилографа с регулируемой плавучестью возможно на основе построения системы управления скоростными режимами его вертикального движения [8]. При этом рассматриваются две фазы процесса профилирования: погружение и всплытие. В целях экономии энергетических ресурсов на фазе погружения автономный профилограф может совершать неуправляемое движение до заданной глубины с некоторой средней крейсерской скоростью $v_{кр} >> v_{доп}$, предустановка которой выполняется с помощью регулятора плавучести. При этом профилирование осуществляется подобно тому, как это делают профилографы *Argo*, на фазе всплытия с вертикальной скоростью $v \le v_{доп}$. В таком случае время проведения эксперимента (океанологической станции) для формирования массивов измерений, необходимых для построения вертикального профиля, будет снижено за счёт сокращения длительности фазы погружения. При этом речь идет о некотором среднем значении крейсерской скорости, так как при вертикальном свободном погружении (всплытии) автономного профилографа при неизменной силе гравитации, действующей на корпус профилографа, в стратифицированной морской среде значение предустановленной крейсерской скорости будет изменяться под действием выталкивающей силы, зависящей, в свою очередь, от изменения плотности окружающей морской воды. Например, при установке $v_{кр} = 2$ м/с в приповерхностном слое время погружения до глубины 2000 м в однородной среде составит примерно 17 мин, что в 20 раз быстрее, чем это делает профилограф класса *Argo*. При движении автономного профилографа в условиях стратифицированной окружающей среды время погружения до заданной глубины увеличится, так как плотность воды в океане растет с глубиной. Поэтому для ускорения фазы погружения профилографа и выведения его на заданную глубину с нулевой скоростью следует применять адаптивный регулятор.

Временные затраты на получение вертикального *CTD* профиля так же могут быть снижены и на фазе всплытия за счет применения умного профилирования [9] в режиме управляемого вертикального движения профилографа, скорость которого автоматически снижается от $v_{кр}$ до $v \le v_{доп}$ при переходе границы разделения горизонтальных слоев воды с различной плотностью и восстанавливается до крейсерского значения в области установившихся значений плотности, окружающей профилограф воды.

На рис. 6 представлена структурная схема моделирования системы автоматического управления динамикой процессов профилирования, которая обеспечивает два скоростных режима профилирования. В рабочем режиме адаптивный регулятор подключён к мехатронному приводу, обеспечивая стабилизацию вертикальной скорости профилографа на уровне, гарантирующем выполнение критерия (9).

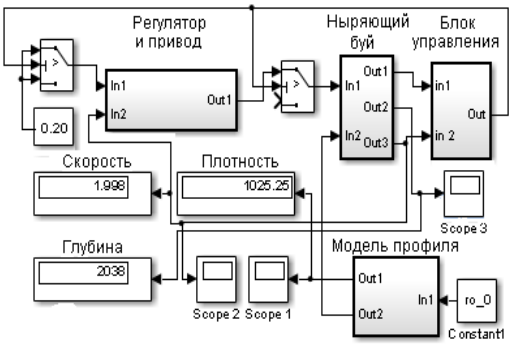


Рис. 6. САУ профилированием
Fig. 6. ACS Profiling

В крейсерском режиме регулятор отключается и неуправляемый профилограф двигается с установившейся скоростью, величина которой значительно превосходит рабочую и определяется плотностью окружающей морской воды и конструкцией его корпуса.

На рис. 7 показаны результаты моделирования двух видов профилирования.

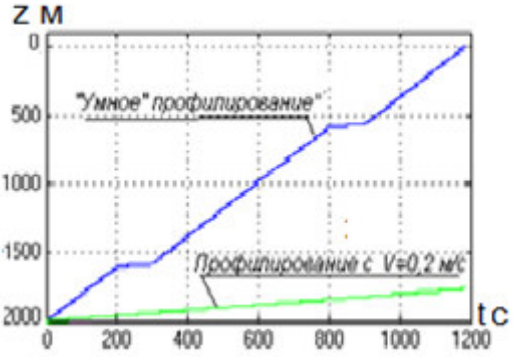


Рис. 7. Графики профилирования
Fig. 7. The profiling charts

Групповое синхронное профилирование. Построение комплексного трехмерного мониторинга океанской среды с учетом профильных измерений невозможно без решения ключевых проблем, связанных с разработкой методов управления движением автономных морских профилографов с регуляторами плавучести и их группировок. При этом так же должна быть разработана концепция построения морской наблюдательной системы для мониторинга океанской среды, использующей группировку совместно работающих smart профилографов, удаленных друг от друга на значительные расстояния и управляемых из единого центра посредством спутниковой связи. Более того, для smart профилографа можно спроектировать терминальный адаптивный регулятор [9], который даст возможность переводить профилограф из исходного состояния на океанской поверхности на заданную глубину за требуемое время и задавать время выхода группировки морских роботов-профилографов на заданный горизонт синхронно во времени. Это весьма важно, например, для исследования характеристик тонкой структуры вод океана и внутренних волн.

Заключение. Применение метода динамических измерений вертикального профиля плотности морской воды в стратифицированной океанской среде как базового метода для разработки алгоритмически-программного обеспечения реального времени морских автоматических информационно-измерительных систем позволяет расширить измерительную базу оперативной океанологии в области исследований океанской толщи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зеленько А.А.* Оперативная океанология: моделирование, мониторинг и прогнозирование гидрофизических полей Мирового океана: дис. … д-ра физ.-мат. наук. Севастополь. 2018. 251 с.

2. *Краснодубец Л.А.* Метод определения вертикального профиля плотности морской воды на основе измерений параметров движения неуправляемого автономного зонда // Системы контроля окружающей среды. 2017. № 10. С. 8–15.

3. *Wright D.G., Pawlowicz R., McDougall T.J., Feistel R., Marion G.M.* Absolute Salinity, “Density Salinity” and the Reference-Composition Salinity Scale: present and future use in the seawater standard TEOS-10 // Ocean Sci., 2011. № 7. P. 1–26.

4. *Lynne D. Talley*. Descriptive Physical Oceanography. Academic Press Inc.(London). 2011. 564 p.

5. *Архипкин В.С., Добролюбов С.А.* Океанология. Физические свойства мор-

ской воды: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. М.: Изд-во Юрайт, 2020. 216 с.

6. *Краснодубец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В.* Управление морскими буями-профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 69–79.

7. https://argo.ucsd.edu/how-do-floats-work/ (дата обращения: 04.02.2022).

8. *Краснодубец Л.А.* Морские наблюдательные системы с подвижными платформами сбора данных. Севастополь: ИПТС. 2018. 208 с.

9. *Краснодубец Л.А.* Концепция применения и моделирование морского автономного *smart* профилографа // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3. С. 106–113.

DYNAMIC MEASUREMENTS IN THE PROBLEMS OF OPERATIONAL OCEANOLOGY IN THE STUDY OF THE PROPERTIES OF THE OCEANIC PLATE

L.A. Krasnodubets[1,2]

[1]Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33
[2] Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The results of a study of the possible application of the basic method of vertical profiling of the oceanic column as a stratified aquatic environment, proposed by the author for using in operational oceanology, are presented. The method provides real-time measurement of the density of sea water in situ as a function of depth. In addition to seawater density profiles, the method allows generating data arrays on the distributions of the total and thermohaline vertical stability of water mass layers and the corresponding Väisälä-Brunt frequency profiles of thermohaline oscillations. Applications of the method for the construction of smart profiling algorithms, which significantly reduce the time of oceanographic stations, as well as synchronous profiling algorithms, are considered. The issues of optimization of processes of dynamic measurements are investigated. The results of computer simulation are presented.
Keywords: profiler, ocean stratification, computer model, seawater density, dynamic measurements, Väisälä-Brunt frequency, vertical stability.

REFERENCES

1. *Zelen'ko A.A.* Operativnaya okeanologiya: modelirovaniye, monitoring i prognozirovaniye gidrofizicheskikh poley Mirovogo okeana: dis. d-ra fiz-mat nauk (Operational Oceanology: Modeling, Monitoring and Forecasting of the Hydrophysical Fields of the World Ocean: Thesys for the Doctor of Physics and Mathematics), Sevastopol', 2018, 251 p.

2. *Krasnodubets L.A*. Metod opredeleniya vertikal'nogo profilya plotnosti morskoy vody na osnove izmereniy parametrov dvizheniya neupravlyayemogo avtonomnogo zonda (Method for determining the vertical density profile of sea water based on measurements of the motion parameters of an uncontrolled autonomous probe). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2017, No. 10, pp. 8–15.

3. *Wright D.G., Pawlowicz R., McDougall T.J., Feistel R., and Marion G.M.* Absolute Salinity, "Density Salinity" and the Reference-Composition Salinity Scale: present and future use in the seawater standard TEOS-10. *Ocean Sci.*, 2011, No. 7, pp. 1–26.

4. *Lynne D. Talley*. Descriptive Physical Oceanography. Academic Press Inc. (London), 2011, 564 p.

5. *Arkhipkin V.S., Dobrolyubov S.A.* Okeanologiya. Fizicheskiye svoystva morskoy vody (Physical properties of sea water), Moscow: Izd-vo Yurayt, 2020, 216 p.

6. *Krasnodubets L.A., Zaburdayev V.I., and Al'chakov V.V.* Upravleniye morskimi buyami-profilemerami kak metod povysheniya reprezentativnosti termokhalinnykh izmereniy. Modeli dvizheniya (Control of marine profiler buoys as a method for increasing the representativeness of thermohaline measurements. Motion models). *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2012, No. 4, pp. 69–79.

7. https://argo.ucsd.edu/how-do-floats-work/ (February 04, 2022)

8. *Krasnodubets L.A*. Morskiye nablyudatel'nyye sistemy s podvizhnymi platformami sbora dannykh (Marine observation systems with mobile data collection platforms), Sevastopol': IPTS, 2018, 208 p.

9. *Krasnodubets L.A*. Kontseptsiya primeneniya i modelirovaniye morskogo avtonomnogo smart profilografa (The concept of application and modeling of a marine autonomous smart profiler). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2020, No. 3, pp. 106–113. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-3-106-113.

УДК 504.064:504.3.054 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-66-73

ЗОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ Г. СЕВАСТОПОЛЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

С.А. Гутник, Е.И. Азаренко, Г.А. Сигора, В.С. Гутник, Л.А. Ничкова, Т.Ю. Хоменко

Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: sigora1@yandex.ru, tamara_homenko93@mail.ru

В статье сделана оценка особенности рельефа местности для определения зоны влияния крупных источников загрязнения. Приведен перечень наиболее крупных стационарных источников загрязнения и транспортных магистралей г. Севастополя с наиболее интенсивным движением. Представлена карта расположения источников выбросов. По разработанному ряду критериев предлагается зонирование территории города Севастополя по интегральному признаку, что позволит обоснованно спланировать сеть постов мониторинга загрязнения атмосферы для сбора репрезентативных данных.

Ключевые слова: мониторинг, атмосферный воздух, загрязняющие вещества, зонирование, город Севастополь, стационарные источники, транспортные магистрали, посты контроля.

Поступила в редакцию: 20.10.2021. После доработки: 10.02.2022.

Введение. Организация мониторинга загрязнения атмосферного воздуха предполагает решение ряда проблем, связанных с локализацией источников загрязнения и разграничением контролируемой территории на зоны, в которых планируется размещение стационарных постов наблюдения и маршруты передвижения мобильных лабораторий. Должны учитываться такие факторы, как локализация и параметры источников выбросов, характеристики территории по назначению и географическим признакам, оптимизация технико-экономических параметров планируемых постов наблюдения и другие.

Общая характеристика источников загрязнения атмосферного воздуха в регионе г. Севастополя и задачи по организации системы мониторинга представлены в предыдущей публикации [1]. Исходя из сделанных в статье выводов, целью данной работы является зонирование территории г. Севастополя для последующей разработки рекомендаций по расположению постов и маршрутов наблюдения при мониторинге.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ территории города по принятым критериям.

2. Локализация основных стационарных источников выбросов и транспортных потоков.

3. Определение границ зон приоритетного расположения постов и маршрутов системы мониторинга.

Основная часть. Зонирование территории для организации контроля за загрязнением атмосферного воздуха в соответствии с рекомендациями [2] должно быть выполнено по следующим признакам:

– производственный (назначение территории);

– географический;

– административный.

Указанные признаки для административной территории г. Севастополя характеризуются рядом отличительных особенностей.

Назначение территории. В административных границах г. Севастополя имеются территории следующего назначения:

– селитебные;

– промышленные;

– военные;

– рекреационные;

– сельскохозяйственные;

– лесные.

Эти типы территорий локализованы не компактно. Отдельные фрагменты всех типов рассредоточены практически

по всему региону. Наиболее обширные концентрации селитебных, промышленных и военных территорий наблюдаются в пределах Гераклейского плато. Рекреационные, сельскохозяйственные и лесные расположены на юго-западе, западе и севере региона. Однако на всей территории города они фрагментированы и вклиниваются друг в друга. Количество отдельных участков каждого типа составляет не менее десяти.

Такое расположение зон сложилось исторически, вследствие большой площади города, необходимости рассредоточения военных объектов и связанных с ними промышленных предприятий, особенностей рельефа и других факторов. По этим причинам фрагментированы и селитебные территории: Центральная часть города, Северная сторона, Инкерман, Балаклава, поселки и села пригородной зоны.

Географическое деление. Географическое деление предполагает учет особенностей разных типов территорий при определении алгоритмов контроля загрязнения воздуха. Например, оно может означать деление на зоны по сторонам света, особенностям рельефа и т.п.

Географические характеристики региона позволяют отнести его в целом к предгорьям. Однако здесь присутствуют элементы рельефа, ландшафта, приморских территорий и акваторий, которые вследствие близкого расположения и территориального взаимопроникновения сформировали отдельные зоны, которые очень трудно либо невозможно отнести к какому-либо одному типу рельефа или ландшафта, т.е. идентифицировать по географическим характеристикам. Однако, южная и восточная часть региона – в основном гористая и лесная, северная – предгорная с редколесьем, центральная и западная – плоскогорье, изрезанное балками и бухтами с редколесьем.

Большая часть городской застройки и 10 из 19 наиболее крупных источников загрязнения атмосферы расположены на Гераклейском плато, являющемся западной оконечностью отрогов Главной, Внутренней и Внешней гряд Крымских гор. Перепад высот на плато – 0…270 м (высота Горная гребня Сапун-горы). На Гераклейском плато расположены Ленинский и Гагаринский районы полностью, частично – Нахимовский и Балаклавский. Вся территория региона характеризуется сложным рельефом, включающем практически все известные его типы: равнины, плато, балки, овраги, речные и сухие долины, куэсты, холмы, горы (в том числе с обрывистыми склонами высотой до 400 м). Наиболее сложен рельеф в южной и восточной частях региона, где он имеет максимальные перепады высот, понижения чередуются с горами, имеющими высоты от примерно 400 м до 922 м (гора Бюзюка).

По районам и муниципальным округам перепады высот составляют:

– Ленинский район – 0…160 м;
– Гагаринский район – 0…120 м;
– Нахимовский район – 0…280 м;
– Качинский округ – 0…60 м;
– Андреевский округ – 0…112 м;
– Верхнесадовский округ–20…280 м;
– Балаклавский район – 0…922 м;
– Орлиновский округ – 0…922 м;
– Терновский округ –140…588 м;
– г. Инкерман – 0…280 м.

Западная часть региона г. Севастополя от северного входного мыса Севастопольского рейда до мыса Херсонес сильно изрезана бухтами, представляющими собой затопленные морем эстуарии древних водотоков, сформировавших рельеф. Это бухты Южная (вторая по величине), Артиллерийская, Карантинная, Песочная, Стрелецкая, Круглая, Камышовая, Казачья. Отдельная бухта такого же типа – Балаклавская.

Самая крупная бухта – Севастопольская, эстуарий древнего устья реки Черной. Все бухты образованы в результате катастрофического подъема уровня мирового океана и перетока воды в котловину Черного озера (в будущем Черного моря). Выраженные понижения рельефа – долины рек Кача, Бельбек и Черная с заложением в общем направлении запад-восток.

Верховья бухт переходят в балки и овраги, поднимающиеся от уровня моря в южном, юго-восточном и северном (Балаклавская долина) направлениях, разрезая в целом относительно плоский рельеф Гераклейского плато. Плато и

рельеф региона в общем понижаются с юга на север. Это обусловлено морфологией и историей формирования рельефа Крыма: часть литосферной плиты, на которой расположен полуостров, вместе с более поздними меловыми отложениями "опрокидывается" в северном направлении из-за давления и подъема более подвижным южным участком литосферы.

Таким образом, рельеф региона г. Севастополя представлен практически всеми типами и может оказывать существенное влияние на рассеяние вредных веществ при выбросе в атмосферу от стационарных источников и транспортных потоков.

Административное деление. Город федерального значения Севастополь включает следующие административно-территориальные единицы [3]:

– Ленинский район;

– Гагаринский район;

– Нахимовский район;

– Балаклавский район.

Наименьшими по площади, но наиболее насыщенными источниками выбросов вредных веществ в атмосферу (как стационарными, так и транспортными магистралями) являются Ленинский и Гагаринский районы. Наибольший по площади Балаклавский район – с наиболее низкой плотностью источников выбросов.

При зонировании территории г. Севастополя учтены наиболее крупные стационарные источники загрязнения и транспортные магистрали. В качестве критерия для определения перечня стационарных источников был определен объем валового выброса загрязняющих веществ – более 20 т/год. В соответствии с этим критерием перечень таких источников и их основные характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1. Перечень наиболее крупных стационарных источников загрязнения

Название организации	Валовые выбросы предприятия, т/год
ООО «Благоустройство города «Севастополя»	2277,107
ООО «Югторсан»	386,084
ООО «СГС Плюс»	254,688
КОС 1 «Южные» ГУПС «Водоканал»	193,864
ООО «Инкерманский завод марочных вин»	109,837
КОС 2 «Северные» ГУПС «Водоканал»	77,447
КОС 12 ГУПС «Водоканал»	54,075
ООО «АВАЛ» «СК «АВЛИТА»	52,430
ООО «Акваклин»	47,812
ГУПС «Севтеплоэнерго» (с. Орлиное, ул. Солнечная 2)	42,498
ГУПС «Севтеплоэнерго» (пер. Новикова, 24а)	38,053
ФГБУН «ИМБИ им. А.О. Ковалевского РАН»	35,028
ГУПС «Севтеплоэнерго» (ул. Вакуленчука, 29)	32,431
ГУПС «Севтеплоэнерго» (ул. Хрусталева, 35)	31,687
АЗС ООО «Кедр» (Фиолентовское шоссе, 5а)	28,936
ООО «Любимый город ЛТД»	25,955
АО «Ремстрой-комплект»	20,915
АЗС ООО «Кедр» (ул. Энергетиков, 11)	20,627
АЗС ООО «Кедр» (пр. Победы, 1)	20,627

Перечень автомобильных дорог и улиц принят на основании следующих основных критериев:

– интенсивность потока (ед./час);

– состав потока (легковые, грузовые автомобили и т.п.);

– средняя скорость транспортных средств;

– количество полос и протяженность автодороги.

Эти показатели определяют общее количество вредных веществ, поступающих в атмосферу при движении транспорта по данной дороге или улице, являющейся линейным источником выброса. При этом за основу при составлении списка был принят «Перечень автомобильных дорог, работающих в режиме перегрузки» [4]. Однако он включает только те участки дорог, которые работают в режиме перегрузки и требуют реконструкции по показателю пропускной способности. При этом они не обязательно соответствуют вышеприведенным критериям интенсивности, состава потока, ширины и протяженности дороги.

В частности, в нем приведены улицы с односторонним движением в основном легковых автомобилей и с относительно небольшой интенсивностью (ул. Ленина, пл. Ушакова, пр. Нахимова, ул. Ковпака, ул. 4-я Бастионная, ул. Н. Музыки), а также короткие связующие участки (ул. Кожанова, ул. Шабалина, участок от пр. Октябрьской Революции до Фиолентовского шоссе). В то же время, в указанном перечне нет таких, безусловно, значимых для учета загрязнения атмосферного воздуха автодорог г. Севастополя, как пр. Генерала Острякова, Балаклавское шоссе, Городское шоссе, Симферопольское шоссе, ул. Котовского, ул. Вокзальная и т.п.

В связи с этим были проведены исследования интенсивности и состава потока на наиболее загруженных транспортом автодорогах г. Севастополя. На основании полученных данных и с учетом перечня по Приложению составлен список из 30 автодорог для расчета рассеивания и определены соответствующие исходные данные.

Таблица 2. Транспортные магистрали г. Севастополя с наиболее интенсивным движением

№	Название	Среднегодовая суточная интенсивность движения автотранспорта (шт.)
1.	Героев Сталинграда пр.	17 883
2.	Октябрьской Революции пр.	9 613
3.	Вакуленчука ул.	42 255
4.	Гагарина пр.	15 692
5.	Пожарова ул.	24 199
6.	Адмирала Октябрьского ул.	37 933
7.	Большая Морская ул.	15 617
8.	Гоголя ул.	18 058
9.	Хрусталёва ул.	21 380
10.	Генерала Острякова пр.	7 418
11.	Балаклавское шоссе	10 082
12.	Руднева ул.	49 383
13.	Льва Толстого ул.	28 524
14.	Фиолентовское шоссе	42 145
15.	Правды ул.	24 422
16.	Камышовое шоссе	19 255
17.	Городское шоссе	16 848
18.	Олега Кошевого ул.	39 468
19.	Котовского ул.	10 916
20.	Вокзальная ул.	51 226
21.	Героев Севастополя ул.	53 993
22.	Брестская ул.	54 808
23.	Багрия ул.	24 600
24.	Генерала Мельника ул.	19 717
25.	Победы пр.	24 885
26.	Горпищенко ул.	22 137
27.	Симферопольское шоссе	19 039
28.	Богданова ул.	4 825
29.	Сапунгорская ул.	30 775
30.	Новикова ул.	12 401

На рис. 1 представлено расположение наиболее крупных стационарных источников выбросов (красные метки) и транспортных магистралей с наиболее интенсивным движением (синие метки). Номера меток соответствуют номерам источников в табл. 1 и 2.

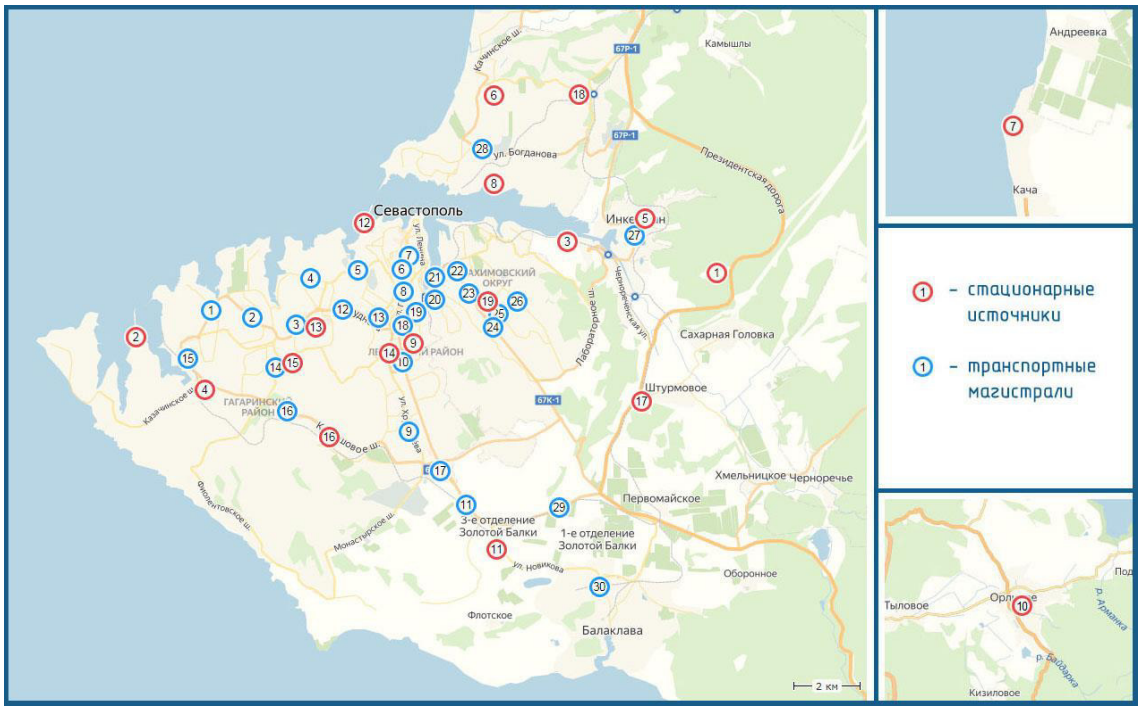


Рис. 1. Карта расположения источников выбросов
Fig. 1. Emission source location map

Участки рельефа территории г. Севастополя в радиусе 2 км от мест расположения стационарных источников с точки зрения влияния на рассеяние вредных веществ в атмосфере можно разделить на следующие четыре типа:

1. Ровные – с незначительными перепадами высот: западная часть Гераклейского плато (Гагаринский район) и северная часть региона (Качинский и Андреевский округи).

2. Возвышения – на выпуклых участках рельефа с существенным понижением высот от источника выброса: северная часть Гераклейского плато (Ленинский район), некоторые участки Нахимовского района.

3. Впадины – в балках, оврагах и вдоль русел рек со значительным подъемом высот от источника выброса: участки Нахимовского и Балаклавского районов.

4. Долины – обширные понижения рельефа, как правило в межгорных котловинах: территория Балаклавы, Инкерманская, Варнутская и Байдарская долины.

Крупные стационарные источники выбросов (табл. 1) распределены по вышеперечисленным типам участков рельефа следующим образом:

1. Ровный: источники 2,4,7,14,15,16.

2. Возвышения: источники 6, 8, 9, 11, 13, 18, 19.

3. Впадины: источники 1,3,5,12,17.

4. Долины: источник 10.

Зонирование территории г. Севастополя только по одному из принятых признаков (административный, географический, производственный) может быть формальным и неоптимальным при определении мест размещения стационарных и маршрутных постов наблюдения. Это объясняется, исходя из вышеиз-

ложенного, следующими причинами:

– административные границы отдельных районов охватывают зоны разного назначения;

– отдельные обширные участки территории, не привязанные к конкретным муниципальным образованиям, характеризуются разной плотностью расположения источников выбросов и существенно разными приземными концентрациями (кратностями по отношению к ПДК) загрязнителей;

– в пределах зон одного назначения или административного деления присутствуют разные типы рельефа, ландшафта и т.п. по географическим характеристикам.

Результаты и выводы. На основании результатов исследования [2, 5] предлагается зонирование территории города по интегральному признаку, основной критерий которого - плотность расположения источников выбросов. Так как при этом в одну и ту же зону попадают участки разных муниципальных образований и территории различного назначения, границы зон проведены по территориально-географическому принципу (русла рек, магистрали и т.п.):

Зона № 1. Территория с наибольшей степенью урбанизации и плотностью городской застройки. Включает все типы по назначению (кроме сельскохозяйственных и лесных). Занимает большую часть Гераклейского плато, Балаклаву и частично Северную сторону. В этой зоне расположено подавляющее количество источников выбросов, в т.ч. основные наиболее загруженные магистрали, и проживает около 90% населения города. Ограничена на севере руслом реки Бельбек до села Фруктовое, далее – автодорогой Севастополь – Симферополь до станции Инкерман-товарный, руслом реки Чёрная до села Хмельницкое, дорогой на села Оборонное и Благодатное, далее на юг – до горы Аскети. На западе – от высоты над мысом Кая-Баши через село Флотское до автодороги Севастополь – Балаклава, от транспортной развязки над магистралью Севастополь – Ялта вдоль железнодорожной линии до Камышовой бухты с окончанием вдоль шоссе на юге от Казачьей бухты.

Зона № 2. Массивы садово-огородных («дачных») участков, расположенных на Гераклейском плато и территориально-географически соседствующие либо внедренные в зону № 1. Крупные источники выбросов, учтенные при расчете рассеивания, отсутствуют. Зона подвержена влиянию выбросов в зоне № 1. Численность постоянно проживающего населения относительно невелика.

Зона № 3. Пригородная, преимущественно сельскохозяйственная и лесная зона. Территориально расположена в Балаклавском и Нахимовском районах. Наиболее обширна по площади, в ее пределах расположены отдельные источники на большом удалении друг от друга. Проживает около 10% населения. Охватывает зоны № 1 и № 2 с севера, востока и юго-востока.

Схема зонирования города Севастополя представлена на рис. 2.

Заключение. Полученные в результате исследования границы зон территории г. Севастополя наряду с результатами инвентаризации выбросов загрязняющих веществ от антропогенных объектов и результатами моделирования загрязнения воздуха позволяют обоснованно спланировать сеть постов мониторинга загрязнения атмосферы в городе для сбора репрезентативных данных, обеспечивающих возможность оценки влияния основных источников и факторов антропогенного воздействия на воздушную среду, расчета рисков для населения, связанных с уровнем загрязнения воздуха.

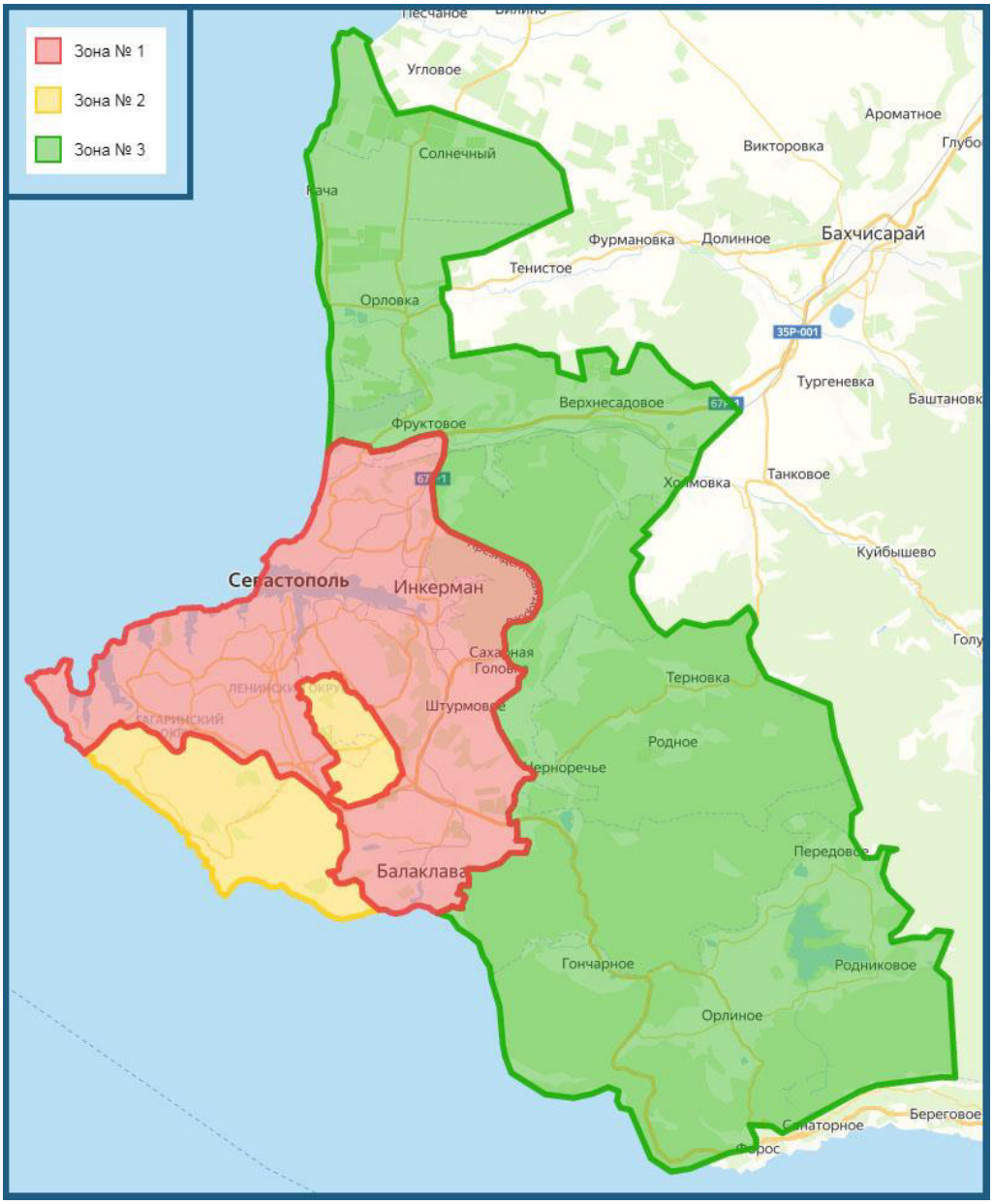


Рис. 2. Зонирование территории г. Севастополя
Fig. 2. Zoning of the territory of Sevastopol

Необходимое в каждой зоне число и расположение постов должно определяться с учетом следующих показателей [6]:

– значимость территории для города в целом (значимость определяется размерами зоны);

– плотность проживания населения или специфика территории (густо населенные районы и зоны рекреации имеют приоритет при размещении точек наблюдения);

– результаты расчета приземных концентраций загрязняющих примесей в воздухе (области высокой аэрогенной нагрузки имеют приоритет при выборе точек наблюдения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Повышение* эффективности системы мониторинга атмосферного воздуха в городе Севастополе / Г.А. Сигора, С.А. Гутник, Е.И. Азаренко [и др.] // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 1 (43). С. 118–128. DOI: 10.33075/2220-

5861-2021-1-118-128

2. *Отчет* по оценке загрязнения атмосферного воздуха города Севастополя стационарными и передвижными источниками (промежуточный по 1 этапу) Т. 1. Текстовая часть. Севастополь. 2019. 80 с.

3. *Город* Севастополь в цифрах 2020 г.: Крат.стат.сб./Крымстат – г. Севастополь, 2021. 195 с.

4. *ГОСТ* 32965–2014 «Методы учета интенсивности движения транспортного потока»: дата введения 2016-09-08 [Электронный источник] / http://docs.cntd.ru/document/1200132267 (дата обращения: 15.10.2019).

5. *Отчет* по оценке загрязнения атмосферного воздуха города Севастополя стационарными и передвижными источниками (по 2-му этапу). Т. 2. Текстовая часть. Севастополь, 2020. 245 с.

6. *РД* 52.04.840-2015. Применение результатов мониторинга качества атмосферного воздуха, полученных с помощью методов непрерывных измерений: утверждён Заместителем Руководителя Росгидромета 29.12.2015: дата введения 2016-03-01. [Электронный источник] / http://docs.cntd.ru/document/1200133380 (дата обращения: 15.10.2019). Текст: электронный.

ZONING OF THE TERRITORY OF THE CITY OF SEVASTOPOL FOR THE ORGANIZATION OF MONITORING OF ATMOSPHERIC POLLUTION

S.A. Gutnik, E.I. Azarenko, G.A. Sigora, V.S. Gutnik, L.A. Nichkova, T.Yu. Khomenko

Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The article evaluates the features of the terrain to determine the zone of influence of large sources of pollution. The list of the largest stationary sources of pollution and transport highways of Sevastopol with the most intensive traffic is given. A map of the location of emission sources is presented. According to a number of criteria developed, zoning of the territory of the city of Sevastopol according to an integral criterion is proposed. That will make possible to reasonably plan a network of atmospheric pollution monitoring posts for collecting representative data.

Keywords: monitoring, atmospheric air, pollutants, zoning, the city of Sevastopol, stationary sources, highways, control posts.

REFERENCES

1. *Sigora G.A., Gutnik S.A., Azarenko E.I., Nichkova L.A., and Khomenko T.Yu.* Povyshenie effektivnosti sistemy monitoringa atmosfernogo vozduha v gorode Sevastopole (Increasing the efficiency of the atmospheric air monitoring system in the city of Sevastopol). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2021, No. 1 (43), pp. 118–128. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-118-128

2. Report on the assessment of atmospheric air pollution in the city of Sevastopol by stationary and mobile sources (intermediate for stage 1), Vol. 1, Text part, Sevastopol, 2019, 80 p.

3. Gorod Sevastopol' v cifrah 2020 g. (City of Sevastopol in numbers 2020), Sevastopol, 2021, 195 p.

4. http://docs.cntd.ru/document/1200132267 (October 15, 2019).

5. Report on the assessment of atmospheric air pollution in the city of Sevastopol by stationary and mobile sources (for the 2nd stage), Vol. 2, Text part, Sevastopol, 2020, 245 p.

6. http://docs.cntd.ru/document/1200133380 (October 15, 2019).

УДК 561.232:574.586 (262.5) DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-74-80

МОНИТОРИНГ СОСТАВА ЦИАНОБАКТЕРИЙ ПЕРИФИТОНА И ЭПИЛИТОНА ПРИБРЕЖНОГО МЕЛКОВОДЬЯ (ЧЁРНОЕ МОРЕ, СЕВАСТОПОЛЬ)

Н.А. Андреева

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: andreeva.54@list.ru

В течение 2017–2021 гг. проводилось исследование состава перифитонных цианобактерий прибрежных акваторий бухт Севастополя. Состав цианобактерий в перифитоне и эпилитоне варьировал по годам в диапозоне 4–7 и 2–8 форм соответственно. За весь период выявлено 16 систематических единиц, являющихся представителями 7 порядков: Chroococcales, Chroococcidiopsidales, Synechococcales, Pleurocapsales, Oscillatoriales, Nostocales и Stigonematales. Абсолютными доминантами в перифитоне стёкол были цианобактерии порядка Oscillatoriales, а в эпилитоне – осцилляториевые и *Pleurocapsa*. Из перифитона и эпилитона было выделено 11 штаммов цианобактерий.

Ключевые слова: цианобактерии, перифитон, эпилитон, прибрежная акватория, штаммы цианобактерий.

Поступила в редакцию: 02.02.2022. После доработки: 14.02.2022.

Введение. На побережье, особенно вблизи городов и устьев больших рек постоянно идет, а в настоящее время и ускоряется процесс изменения качества окружающей среды, что ведет за собой изменение состояния прибрежной биоты. С другой стороны, фитопланктонные и перифитонные организмы сами принимают участие в процессах формирования качества вод.

Сообщества перифитона (обрастания) представляют собой пространственно сложные структуры, включающие неподвижные и подвижные формы, а также органический матрикс (слизь), детрит и неорганические частицы. Перифитон наряду с другими литоральными сообществами способен аккумулировать биогенные элементы и загрязняющие вещества. Высокое видовое разнообразие перифитона, как правило, соответствует благополучному состоянию данной экосистемы. Поэтому перифитонным организмам часто отдаётся предпочтение при биологической индикации качества поверхностных вод, позволяя судить о среднем загрязнении их за определенный промежуток времени**,** предшествующий исследованию [1]. Однако до настоящего времени перифитон остается одним из наименее изученных компонентов морских экосистем.

Перифитонные водоросли вместе с другими организмами, образующими обрастание, играют значительную роль в жизни водоемов. Кроме индикации качества воды, они являются продуцентами органического вещества, а также кормом для водных животных. Эти организмы прикрепляются к субстрату при помощи специальных органов (подошвы, стопы, слизистых тяжей) или слизистой поверхностью таллома [2]. Как было показано, в состав перифитона входят водоросли из различных систематических групп, однако преобладают представители отделов Chlorophyta, Cyanoprokaryota, Bacillariophyta и Xanthophyta.

Цианобактерии (Cyanoprokaryota) являются неотъемлемым компонентом альгоценозов морских обрастаний как искусственных (металл, бетон, стекло и др.), так и естественных субстратов (например, камней). Отмечено, что среди цианобактерий важное значение в фор-

мировании фитоцена перифитона имеют представители таких родов, как *Spirulina, Lyngbia, Nostoc, Rivularia* [3].

Сообщество организмов, которое развивается на поверхности камней в водной среде обитания, называется эпилитоном [4]. Оброст камней, судя по литературным данным, изучен слабо, а упоминания цианобактерий в этой связи вообще единичны [5, 6]. Однако, они (цианобактерии) также могут служить надёжными индикаторами экологического состояния среды. Некоторые цианобактерии, обнаруженные в эпилитоне литоральной зоны, являются фиксаторами азота и вносят значительный вклад в продуктивность морских экосистем.

Цель данной работы – изучить состав и некоторые особенности форм существования цианобактерий в сообществах перифитона «стёкол обрастания» и эпилитона естественного обрастания камней прибрежной акватории бухт Севастополя в течение пяти лет; получить несколько альгологически чистых культур данных микроорганизмов.

Материалы и методы. Исследования проводились в течение пяти лет, с 2017 по 2021 год в черноморской акватории прибрежной зоны бухт Севастополя. За весь период было отобрано 147 образцов перифитона и 129 образцов эпилитона.

Перифитон изучали методом «стекол обрастания». Три стекла (размер 25х75 мм) закрепляли в резиновой трубке с прорезями на расстоянии 5 см друг от друга. Первое стекло погружали на глубину 10 см. Погружение и выемку стекол из воды и исследование эпилитона проводили ежемесячно в трехкратной повторности. Организмы перифитона и эпилитона изучали в суспензии соскобов.

Для изучения морфологии цианобактерий перифитона и эпилитона и для выделения альгологически чистых изолятов проводился посев материала на жидкую модифицированную среду Громова № 6, имеющую следующий состав: KNO_3 – 1,0 г; K_2HPO_4 – 0,2 г; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,2 г; $CaCl_2$ – 0,15 г; $NaHCO_3$ – 0,2 г; раствор микроэлементов – 1 мл; вода морская – 1000 мл. *Состав раствора микроэлементов*: $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,22 г; $MnSO_4$ – 1,81 г; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ – 0,079 г; $NaBO_3 \cdot 4H_2O$ – 2,63 г; $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ – 1,0 г; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 9,3 г; $Co(NO_3)_2 \cdot H_2O$ – 0,02 г; трилон Б – 10,0 г; вода дистиллированная – 1000 мл.

Культивирование образцов осуществлялось в течение 30−120 суток при искуственном освещении в светостате и комнатной температуре.

Прижизненные препараты цианобактерий изучались с использованием светового микроскопа при увеличении х 400. Фотографирование культур проводилось при помощи цифровой насадки биологического микроскопа Levenhuk 740T с использованием компьютерной программы Levenhuk ToupView и дальнейшей обработкой изображений в программе Adobe Photoshop CS3 Extended. Таксономическую принадлежность цианобактерий устанавливали при помощи определителей [7−9].

Результаты и обсуждения. В результате исследования образцов перифитона «стёкол обрастания» и эпилитона на протяжении пяти лет были получены данные по составу цианобактериальной компоненты в этих экотопах (табл. 1).

Важными факторами, влияющими на состав и биоразнообразие любого морского фитосообщества являются сезонные колебания температуры и уровня солнечной радиации. Как показали наши исследования в обрастаниях (перифитоне и эпилитоне), наименьшее количество форм цианобактерий наблюдалось во время весеннего сезона при низкой температуре воды, а наибольшее − в летний и осенний периоды, когда температура воды достигала 22−24°С.

Таблица 1. Состав цианобактериальной компоненты в перифитоне и эпилитоне акватории прибрежного мелководья (Чёрное море, Севастополь)

Систематич. принадлежность	Год									
	2017		2018		2019		2020		2021	
	П*	Э**	П	Э	П	Э	П	Э	П	Э
Chroococcus	-	+	-	-	+	-	+	+	-	-
Microcystis	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+
Merismopedia	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Gloeocapsa	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cyanosarcina	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Chroococcidiopsis	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Limnothrix	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Leptolyngbya	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-
Pleurocapsa	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+
Oscillatoriales	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Spirulina	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Phormidium	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nostoc	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Calothrix	-	-	-	+	-	-	-	+	+	+
Stigonematales	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Неидентиф.ЦБ	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+
Кол-во сист.ед.	**6**	**2**	**7**	**7**	**4**	**4**	**6**	**8**	**6**	**7**

* – перифитон; ** – эпилитон

В то же время, выявлено изменение разнообразия цианобактерий по годам. Как видно из таблицы, их состав в перифитоне и эпилитоне варьировал по годам в диапозоне 4–7 и 2–8 таксонов соответственно. Наименьшее число форм в перифитоне отмечено в 2019 году, а в эпилитоне – в 2017 г. Наибольшее разнообразие цианобактерий в перифитоне было выявлено в 2018 и 2021 гг. (7 единиц), а в эпилиптоне максимум наблюдался 2020 году.

Всего в перифитоне «стёкол обрастания» и эпилитоне камней, взятых в зоне прибрежного мелководья, было определено 16 форм (12 и 11 соответственно) цианобактерий с разнообразной формой организации. Данные микроорганизмы обнаруживались в пробах каждый месяц в течение всего года, а их разнообразие в эти периоды в зависимости от сезона колебалось от 1 до 5 таксонов в перифитоне и от 1 до 6 таксонов – в эпилитоне. В составе исследованных сообществ присутствовали представители 7 порядков: Chroococcales (*Chroococcus, Microcystis*, *Gloeocapsa, Merismopedia, Cyanosarcina*), Chroococcidiopsidales (*Chroococcidiopsis*), Synechococcales (*Limnothrix* и *Leptolyngbya*), Pleurocapsales (*Pleurocapsa*), Oscillatoriales, Nostocales (*Nostoc* и *Calothrix*) и Stigonematales (только в эпилитоне), а также несколько форм неидентифицированных цианобактерий.

Наиболее распространёнными в обоих экотопах являлись представители порядка Oscillatoriales (*Phormidium, Lyngbya, Spirulina* и другие). Осцилляториевые могли быть как в виде отдельных многоклеточных трихомов, так и образовывать определенного вида группировки. Среди осцилляториевых интересно отметить *Spirulina.* Ее тело представляло собой неветвящуюся многоклеточную нить в форме спирали.

Хроококковые цианобактерии из рода *Microcystis* в обрастаниях формировали два вида колоний: шаровидные и бесформенные, а *Merismopedia* образовывали микроскопические колонии в виде однослойных квадратных или прямоугольных пластинок, иногда с неправильными очертаниями. Своеобразные многоклеточные пластинчаные образования в обрастаниях формировали также представители родов *Cyanosarcina* и *Chroococcidiopsis.*

В перифитонных сообществах (особенно в эпилитоне) часто встречались цианобактерии рода *Pleurocapsa*, принадлежащие к порядку Pleurocapsales. В исследованных нами образцах *Pleurocapsa* образовывала или агрегаты клеток, или более сложные псевдофиламентные клеточные сообщества. У более сложноорганизованных многоклеточных нитчатых представителей порядка Nostocales, обнаруженных в перифитоне, наблюдалась клеточная дифференциация.

Выявлено, что некоторые систематические единицы были выявлены только в перифитоне и отсутствовали в эпилитоне и наоборот. Так, цианобактерии родов *Merismopedia,* и *Nostoc,* а также порядка Stigonematales, встречались только в эпилитоне; напротив, *Cyanosarcina, Chroococcidiopsis, Limnothrix* и *Phormidium* – только в перифитоне «стёкол обрастания».

Абсолютными доминантами в перифитоне «стёкол обрастания» (частота встречаемости 100%) были цианобактерии порядка Oscillatoriales, а в эпилитоне – осцилляториевые и *Pleurocapsa*. Некоторые представители цианобактерий, встречающиеся в исследуемых экотопах представлены на рис. 1 и 2.

В процессе альгологических исследований осуществлялась работа по выделению (изоляции) новых альгологически чистых штаммов цианобактерий.

Известно, что первым шагом на пути к успешной изоляции водорослей и цианобактерий из природы являются комплексные данные об их среде обитания. В дальнейшем необходима сложная процедура очистки этих культур от сопутствующей микрофлоры. Однако перспективы использования коллекционных штаммов микроводорослей и цианобактерий очень широки и не вызывают сомнения. Во-первых, они могут применяться для оценки уровня загрязнения окружающей среды, о чём говорилось выше. Во-вторых, в настоящее время особый интерес представляет получение биологически активных субстанций, обладающих антибактериальными, противораковыми и другими свойствами. Кроме того, такие коллекции имеют огромное научное и прикладное значение, в качестве «банка» хранения генофонда организмов [10] и как объекты для проведения различных лабораторных исследований. Всего из перифитона и эпилитона было выделено 11 штаммов цианобактерий (табл.2). Как видно из таблицы, восемь штаммов являлись представителями порядка Oscillatoriales и только три – Chroococcales.

По заключенному договору о научном сотрудничестве полученные штаммы были переданы для депонирования в Ресурсный центр «Культивирование микроорганизмов» СПбГУ (г. Санкт-Петербург).

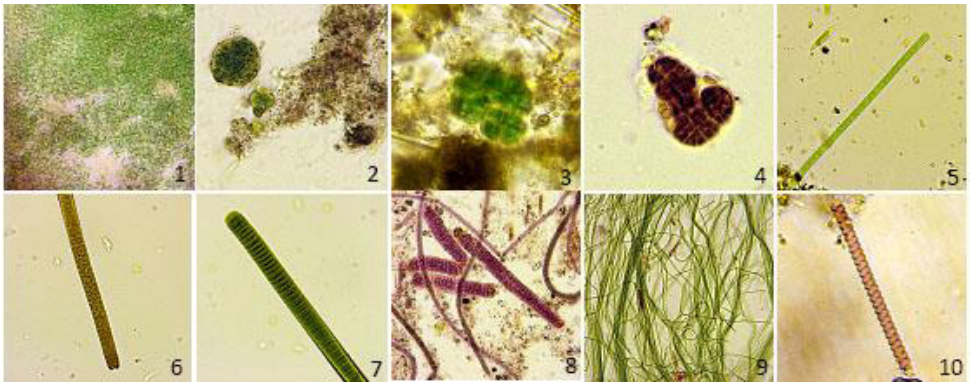


Рис. 1. Цианобактерии перифитона «стёкол обрастания»
1, 2 – *Microcystis;* 3 – *Cyanosarcina;* 4 – *Pleurocapsa;* 5–9 – Oscillatoriales; 10 – *Spirulina*
Fig. 1. Cyanobacteria periphyton "fouling glasses"
1,2 – *Microcystis;* 3 – *Cyanosarcina;* 4 – *Pleurocapsa;* 5–9 – Oscillatoriales; 10 – *Spirulina*

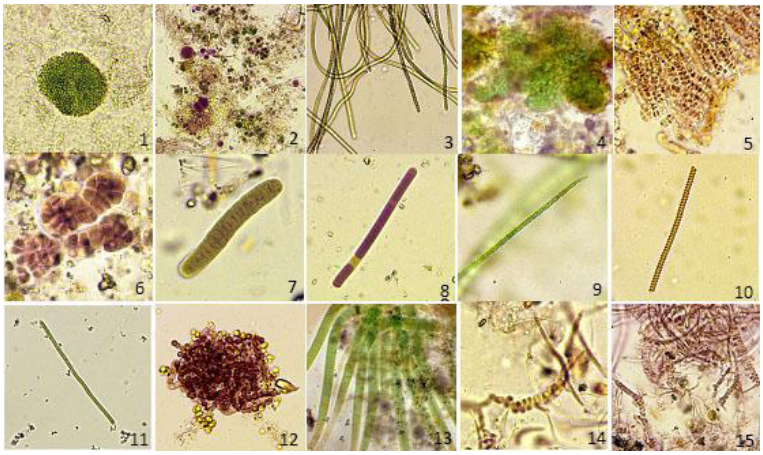


Рис. 2. Цианобактерии эпилитона прибрежной акватории
1 – *Microcystis;* 2 – *Chroococcus;* 3 – *Leptolyngbya*; 4 – *Merismopedia;* 5, 6 – *Pleurocapsa;* 7,8, – Oscillatoriales; 9 – *Phormidium;* 10,11 – *Spirulina*; 12 – *Nostoc* 13 – *Calothrix;* 14,15 – Stigonematales
Fig. 2. Epilithon cyanobacteria in coastal waters
1 – *Microcystis;* 2 – *Chroococcus;* 3 – *Leptolyngbya*; 4 – *Merismopedia;* 5,6 – *Pleurocapsa;* 7,8, – Oscillatoriales; 9 – *Phormidium;* 10,11 – *Spirulina*; 12 – *Nostoc* 13 – *Calothrix;* 14,15 – Stigonematales

Таблица 2. Штаммы цианобактерий, выделенные из образцов перифитона и эпилитона

Обозначение штамма	Откуда выделен	Дата изоляции	Систематическая принадлежность
1	2	3	4
37	Перифитон	20.07.17	пор. Chroococcales род *Microcystis*
38	Перифитон	20.07.17	пор. Chroococcales род *Microcystis*
46	Перифитон	02.05.17	пор. Oscillatoriales
49	Перифитон	05.03.18	пор. Oscillatoriales
54	Перифитон	04.09.17	пор. Oscillatoriales
63	Перифитон	03.09.18	пор. Oscillatoriales
68	Эпилитон	17.09.18	пор. Oscillatoriales
114	Перифитон	31.08.20	пор. Oscillatoriales
116	Перифитон	31.08.20	пор. Chroococcales род *Aphanothece*
136	Эпилитон	27.08.21	пор. Oscillatoriales
140	Эпилитон	27.08.21	пор. Oscillatoriales

Заключение. Таким образом, в результате проведённых исследований были получены результаты по составу цианобактерий в сообществах автотрофных микроорганизмов перифитона «стёкол обрастания» и эпилитона прибрежных акваторий бухт Севастополя.

В перифитонных сообществах бухт за весь период было определено 16 таксонов, представленных 7 порядками: Chroococcales (*Chroococcus, Microcystis*, *Gloeocapsa, Merismopedia, Cyanosarcina*), Chroococcidiopsidales (*Chroococcidiopsis*), Synechococcales (*Limnothrix* и *Leptolyngbya*), Pleurocapsales (*Pleurocapsa*), Oscillatoriales, Nostocales (*Nostoc* и *Calothrix*) и Stigonematales, а также несколькими формами неидентифицированных цианобактерий.

Выявлено, что некоторые таксоны обнаруживались только в перифитоне и

отсутствовали в эпилитоне и наоборот. Биоразнообразие цианобактерий в сообществах обрастателей изменялось в зависимости от сезона и года.

В качестве приспособления для существования на поверхности субстрата большинство перифитонных цианобактерий образовывали разнообразные микроколонии или определенного вида группировки.

Абсолютными доминантами в перифитоне «стёкол обрастания» (частота встречаемости 100%) были цианобактерии порядка Oscillatoriales, а в эпилитоне – осцилляториевые и *Pleurocapsa*.

В процессе альгологических исследований из перифитона и эпилитона было выделено 11 штаммов цианобактерий, в основном представителей порядка Oscillatoriales и Chroococcales.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме "Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия" № 0012-2019-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 *Руководство* по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных обложений / под ред. В.А. Абакумова. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 239 с.

2. *Перифитонные* водоросли. 2015. https://studopedia.ru/7_4979_perifitonnie-vodorosli.html (дата обращения: 20.12.21).

3. *Сорокин Ю.И.* Экосистемы коралловых рифов / под ред. Б.С. Соколова. М.: Наука, 1990. 502 с.

4. *Fry J.C., Day M.* Bacterial genetics in natural environments. Chapman and Hall, London, 1990. 44 p.

5. *Луценко Е.С., Шалыгин С.С., Давыдов Д.А.* Перифитонные цианобактерии литорали Кольского залива Баренцева моря // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16. № 3. С. 472–477.

6. *Мирошниченко Е.С.* Бактериозы эпилитона литорали южного и среднего колен Кольского залива Баренцева моря: дис. … канд. биол. наук. Мурманск, 2016. 176 с.

7. *Кондратьева Н.В.* Синьозелені водорості – Cyanophyta. Ч. 2. Класс Гормогонієві – Hormogoniophyceae: в кн. Визначник прісноводних водоростей Української РСР. Вип. 1. Київ: Наукова думка, 1968. 523 с.

8. *Кондратьева Н.В., Коваленко О.В., Приходькова Л.П.* Синьозелені водорості – Cyanophyta. Загальна характеристика синьозелених водоростей – Cyanophyta. Класс Хроококові – Chroococcophyta. Класс Хамесифонові – Chamaesiphonophyceae: в кн. Визначник прісноводних водоростей Української РСР. Вип. 1. Київ: Наукова думка, 1984. 388 с.

9. *Определитель* бактерий Берджи / под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса. М.: Мир, 1997. Т. 1-2. 799 с.

10. *Impacts* of Climate Change on the Occurrence of Harmful Algal Bloom // United States Environmental Protection Agency. 2013 / https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/climatehabs.pdf (дата обращения: 10.11.21).

MONITORING THE COMPOSITION OF PERIPHYTON AND EPILITON CYANOBACTERIA IN THE COASTAL SHALLOW WATER (BLACK SEA, SEVASTOPOL)

N.A. Andreeva

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

During 2017–2021 a study of the composition of periphytic cyanobacteria in the coastal waters of the bays of Sevastopol was carried out. The composition of cyanobacteria in the periphyton and epilithon varied over the years in the range of 4–7 and 2–8 forms, respectively. Over the entire period, 16 systemat-

ic units have been identified, which are representatives of 7 orders: Chroococcales, Chroococcidiopsidales, Synechococcales, Pleurocapsales, Oscillatoriales, Nostocales and Stigonematales. The absolute dominants in the periphyton of the glasses were cyanobacteria of the order Oscillatoriales, and oscillatory and Pleurocapsa in the epilithon. 11 strains of cyanobacteria have breen isolated from periphyton and epilithon.
Keywords: cyanobacteria, periphyton, epilithon, coastal waters, cyanobacteria strains.

REFERENCES

1. Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh oblozheniy (Guidance on methods of hydrobiological analysis of surface waters and bottom deposits). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 239 p.

2. https://studopedia.ru/7_4979_perifitonnie-vodorosli.html (December 20, 2021).

3. *Sorokin Yu.I.* Ekosistemy korallovykh rifov (Ecosystems of coral reefs). Moscow: Nauka, 1990. 502 p.

4. *Fry J.C. and Day M.* Bacterial genetics in natural environments. Chapman and Hall, London, 1990, 44 p.

5. *Lutsenko Ye.S., Shalygin S.S., and Davydov D.A.* Perifitonnyye tsianobakterii litorali Kol'skogo zaliva Barentseva morya (Periphytic cyanobacteria of the littoral of the Kola Bay of the Barents Sea). *Vestnik MGTU*, 2013, Vol. 16, No. 3, pp. 472–477.

6. *Miroshnichenko Ye.S.* Bakteriozy epilitona litorali yuzhnogo i srednego kolen Kol'skogo zaliva Barentseva moray: Diss. kand. biol. nauk (Bacterioses of the epilithon of the littoral of the southern and middle knees of the Kola Bay of the Barents Sea. Cand. biol. sci. thesis). Murmansk, 2016, 176 p.

7. *Kondrat'eva N.V.* Syn′ozeleni vodorosti – Cyanophyta. Chast'. 2. Klass Hormohoniyevi – Hormogoniophyceae: v kn. Vyznachnyk prisnovodnykh vodorostey Ukraïns′koï RSR. Vyp. 1. (Blue-green algae – Cyanophyta. Part 2. Hormogoniophyceae class: in the book. Determinant of freshwater algae of the Ukrainian SSR. Rel. 1). Kyïv: Naukova dumka, 1968, 523 p.

8. *Kondrat'eva N.V., Kovalenko O.V., and Prykhod'kova L.P.* Syn′ozeleni vodorosti – Cyanophyta. Zahal′na kharakterystyka syn′ozelenykh vodorostey – Cyanophyta. Klass Khrookokovi – Chroococcophyta. Klass Khamesyfonovi – Chamaesiphonophyceae: v kn. Vyznachnyk prisnovodnykh vodorostey Ukraïns′koï RSR. Vyp. 1. (Blue-green algae – Cyanophyta. General characteristics of blue-green algae – Cyanophyta. Chroococcophyta class. Class Khamesifonov – Chamaesiphonophyceae: in the book. Determinant of freshwater algae of the Ukrainian SSR. Rel. 1). Kyïv: Naukova dumka, 1984, 388 p.

9. *Khoult Dzh., Krig N., Snit P., Steyli Dzh., and Uil'yams S.* Opredelitel' bakteriy Berdzhi (Determinant of bacteria Bergey). Moscow: Mir, 1997. Vol. 1-2, 799 p.

10. https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/climatehabs.pdf (November 10, 2021).

УДК 543.97 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-81-85

ИЗУЧЕНИЕ ТОКСИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕФТЕЗАГРЯЗНЁННОЙ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ БИОТЕСТИРОВАНИЯ

И.В. Овсянникова, В.В. Пряничникова, Р.Р. Кадыров, И.А. Кичигин, И.Р. Шугаепов, Б.А. Яппаров

Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Стерлитамаке, РФ, Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, пр. Октября, 2
E-mail: inna.ovsyannikova.80@mail.ru

В работе приведены результаты исследования токсичности серой лесной почвы, загрязнённой нефтью, по методике ФР.1.39.2016.24117. В качестве тест объекта были использованы семена растений кресс-салата сорта «Забава». Оценку токсичности проводили по пяти параметрам: всхожесть семян, средняя длина подземной, надземной частей и общая длина проростков, их средний сухой вес. Проведенные исследования показывают, что наиболее чувствительными параметрами являются всхожесть семян, а также средняя длина подземной, надземной частей и общая длина проростков. Выявлена тенденция негативного влияния на растения содержания нефти в анализируемой почве Полученные результаты показывают возможность использования методов фитотестирования для анализа степени очистки почв.

Ключевые слова: биотестирование, кресс-салат, почва, токсичность, средняя длина, всхожесть семян, сухой вес, коэффициент корреляции.

Поступила в редакцию: 19.10.2021. После доработки: 06.02.2022.

Введение. При нефтедобыче и эксплуатации нефтепроводов всегда существует вероятность возникновения аварийных ситуаций, следствием которых может стать нефтяное загрязнение почв [1-2]. Поэтому особую значимость приобретают задачи по разработке экономичных, но достаточно точных методов оценки степени загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами [3]. Одним из таких методов является биотестирование. Наиболее доступными и простыми в использовании тест-объектами являются семена растений. Биотестирование позволяет производить интегральную оценку токсичности почв контактным методом, что в данном случае является особо важным фактором. Анализ водной вытяжки нефтезагрязнённых почв может приводить к искажению результатов, так как нефть и нефтепродукты не растворимы в воде, поэтому большую точность обеспечивает посев непосредственно на почвенной среде.

Целью описываемых исследований является определение токсичности нефтезагрязненной серой лесной почвы по методике ФР.1.39.2016.24117 [4]. Биотестирование проводилось с использованием семян кресс-салата сорта «Забава».

Материалы и методы. Для приготовления модельной среды серую лесную почву загрязняли нефтью Ишимбайского месторождения в количестве 100 г. нефти на 1 кг почвы. Физико-химические свойства почвы приведены в табл. 1. Дополнительно подготавливали ряд разведений смесей модельной почвы с контрольной (чистой) в соотношениях: 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32. В качестве модельной использовалась почва, отобранная в Республике Башкортостан, в местности, удаленной от дорог и населенных пунктов более, чем на 500 метров, глубина отбора составляла 0-10 см. Физико-химические свойства почвы приведены в табл. 2 [2].

Стаканчики, предназначавшиеся для экспериментов, наполняли 50,0 г. модельной почвы, при этом каждый вид разведения и контрольную пробу готовили в трёх повторах. Далее в стаканчики с почвой высеивали семена кресс салата по 20 штук на одинаковом расстоянии друг от друга на глубину 1,0 см. Затем осуществляли полив 15 мл дистиллированной водой. На седьмые сутки

после начала эксперимента проводили измерение всхожести семян (%), длины подземной, надземной частей проростков и их общей длины (мм).

Таблица 1. Физико-химические показатели нефти Ишимбайского месторождения

Анализируемые показатели	Результат измерения	ГОСТ
Плотность, кг/м^3	921	ГОСТ 3900-85
Вязкость, мм^2/с	144,5	ГОСТ 33-2016
Температура вспышки в закрытом тигле, ^{0}С	58,7	ГОСТ 4333-2014
Содержание серы (S), %	3,78	ГОСТ Р 51947-2002
Содержание воды	отсутствует	ГОСТ 2477-2014

Таблица 2. Основные физико-химические показатели анализируемой почвы

Анализируемые показатели	Серая лесная (0-10см)	ГОСТ
Влажность, %	1,80	ГОСТ 28268-89
Содержание гумуса, %	4,26	ГОСТ26213-91
pH_{KCl} солевой вытяжки почв	3,49	ГОСТ 26483-85
pH водной вытяжки почв	4,82	ГОСТ 26423-85
Минерализация водной вытяжки почв, ppm	17,10	с помощью прибора COM-100

Коэффициенты корреляции рассчитывались для 15 пар наблюдений, при которых достоверными считались r>0,514 при доверительной вероятности 95% [5, 6].

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Statistica_5.0.

Результаты исследования представлены в табл. 3.

Таблица 3. Средние значения анализируемых параметров

Анализируемые параметры		Кратность разбавления пробы					
		Контрольная проба	Неразбавленная проба	1:2	1:4	1:8	1:16
Всхожесть семян (%)	$\bar{x}$	95,0	63,3	70,0	90,0	90,0	86,6
	±SD	5,0	2,9	8,7	5,0	8,7	10,4
Длина подземной части проростка (мм)	$\bar{x}$	79,5	21,9	36,5	41,4	46,6	59,9
	±SD	18,3	7,7	17,0	16,7	17,2	17,5
Длина надземной части проростка (мм)	$\bar{x}$	37,4	11,6	20,5	24,2	25,3	28,7
	±SD	5,9	3,2	4,8	5,0	3,6	4,7
Общая длина проростка (мм)	$\bar{x}$	116,9	33,5	57,0	65,6	71,9	88,5
	±SD	19,5	9,1	17,9	19,0	18,5	19,6
Средний сухой вес проростка (мг)	$\bar{x}$	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	1,3
	±SD	0,3	0,4	0,5	0,3	0,3	0,4

Примечание: 1:2 (4, 8, 16, 32) – разбавление исходной пробы с контрольной почвой

В анализируемой почве всхожесть семян составила от 63,0 до 90,0%. В пробе с концентрацией нефти в почве 100 г/кг (неразбавленная проба) всхожесть семян составила 63,3%, что на 31% ниже, чем в контрольной пробе. Полученные результаты свидетельствуют о проявлении негативного влияния токсиканта на всхожесть семян кресс-салата. Стандартное отклонение составляет не более 10,4.

Средняя длина подземной части проростка кресс-салата с увеличением разбавления возрастает и варьируется в пределах 21,9 – 60,0 мм. В неразбавленной пробе длина подземной части проростка значительно меньше по сравнению с контрольной пробой, что говорит о проявлении токсичного эффекта анализируемой среды на тест-объект.

Длина надземной части проростка аналогично возрастает с уменьшением содержания нефти в почве.

Средняя длина надземной части проростков в неразбавленной пробе на 25,8 мм меньше, чем в контрольной, что также свидетельствует об оказываемом токсическом эффекте (см. табл. 2).

Средняя общая длина проростка увеличивается с повышением разбавления. В контрольной пробе она на 71% превышает среднюю общую длину проростка в неразбавленной пробе.

Средний вес сухих проростков составляет в среднем 1,2 г.

Зависимость анализируемых параметров от кратности разбавления среды представлена в табл. 4.

Во всех изучаемых случаях за исключением среднего веса сухих проростков, выявлена положительная достоверная корреляционная зависимость.

В связи с этим параметр «средний сухой вес» не рекомендуется использовать для определения токсичности почвы.

Таблица 4. Корреляционная связь анализируемых морфометрических параметров кресс-салата и кратности разбавления исходной пробы

Статистика	Анализируемые параметры				
	Всхожесть, %	Средняя длина подземной части проростков, мм	Средняя длина надземной части проростков, мм	Средняя общая длина проростков, мм	Средний вес сухих проростков, мг
Коэффициент корреляции	0,57*	0,89	0,77	0,86	0,06

*-положительные коэффициенты корреляции.

Таблица 5. Уравнения регрессии

Статистика	Анализируемые параметры			
	Всхожесть, %	Средняя длина подземной части проростков, мм	Средняя длина надземной части проростков, мм	Средняя общая длина проростков, мм
Коэффициент корреляции	Y=72,3+1,3×X	Y=28,8+2,07×X	Y=16,9+0,867×X	Y=45,7+2,9×X

Примечание: Y-анализируемый параметр; X-кратность разбавления

Уравнения регрессии представлены в табл. 5. Используя уравнения регрессии можно определить безопасную кратность разбавления (кратность разбавления, при которой анализируемые параметры будут равняться контрольным значениям).

Кратность разбавления, при которой семена взойдут на 95%, составляет 17,5. Для средней длины подземной части проростков и средней общей длины проростков безопасная кратность разбавления равна 24,5–24,6. Анализируемую почву нужно разбавить в 20,5 для средней надземной длины проростков.

Заключение. Проведенные исследования показывают, что наиболее чувствительными параметрами являются всхожесть семян, средняя длина подземной, надземной частей и общая длина проростков. Средний сухой вес проростка не может использоваться для определения токсичности среды, так как не выявлена достоверная зависимость его величины от кратности разбавления почвы. По всем параметрам почва, содержащая 100 г/кг нефти, является токсичной для растений, что свидетельствует о снижении плодородия. Наиболее чувствительными параметрами являются средняя подземная длина проростков и средняя общая длина проростка, так как для их роста и развития необходимо анализируемую почву разбавить в 24 раза. Полученные результаты говорят о возможности использования рассматриваемого метода фитотестирования для анализа свойств почвы, в том числе для оценки степени очистки почв при ее рекультивации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 18-29-24041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Овсянникова И.В.* Новые методики биотестирования с использованием растений кресс-салата (*Lepidium sativum*) для экологического контроля окружающей среды // Системы контроля окружающей среды–2016: Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. 2016. 108 с.

2. *Овсянникова И.В.*, *Хайруллин Р.М.* Новый метод определения токсичности почв, загрязнённых нефтью и нефтепродуктами // Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование. Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ им. А.Н. Косыгина» на Международном Косыгинском Форуме-2019 «Современные задачи инженерных наук». 2019. С. 257–259.

3. *Шулаев Н.С.* Электрохимическая очистка грунтов с различной концентрацией нефтяных загрязнений при использовании единого источника электрического напряжения / В.В. Пряничникова, Р.Р. Кадыров, И.В. Овсянникова, Н.А. Быковский, Р.М. Даминева // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 6. С. 674–680.

4 *Методика* определения токсичности почв по всхожести семян и измерению средней длины проростка кресс-салата (*Lepidium sativum*) ФР.1.39.2016.24117.

5. *Знобищева Н.О.* Изучение токсикологического состояния поверхностных вод реки Ашкадар с использованием методов биотестирования / Т.Х. Галиев, Р.Р. Хатмуллина, И.В. Овсянникова, А.А. Исламутдинова // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 2 (40). С. 97–101

6. *Урбах В.Ю.* Биометрические методы (статистическая обработка опытных данных в биологии, сельском хозяйстве и медицине). М.: Наука, 1964. 415 с.

STUDY OF TOXIC PROPERTIES OF OIL-CONTAMINATED SOIL USING BIOTESTING METHODS

I.V. Ovsyannikova, V.V. Pryanichnikova, R.R. Kadyrov, I.A. Kichigin, I.R. Shugaepov, B.A. Yapparov

Ufa State Petroleum Technological University, Branch of the University in the City of Sterlitamak, RF, Republic of Bashkortostan, Sterlitamak, Octyabrya Av., 2

The article presents the results of a study of the toxicity using the method of FR.1.39.2016.24117 for gray forest soil contaminated with oil. Seeds of watercress plants of the Zabava variety are used as a test object. Toxicity is assessed by five parameters: seed germination, average length of underground and aboveground parts and total length of seedlings, their average dry weight. The studies show that the most sensitive parameters are seed germination, as well as the average length of the underground, aboveground parts and the total length of seedlings. The tendency of the negative effect of the oil content on plants in the analyzed soil is established. The obtained results show the possibility of using phytotesting methods for analyzing the degree of soil purification.
Keywords: biotesting, watercress, soil, toxicity, average length, seed germination, dry weight, correlation coefficient.

REFERENCES

1. *Ovsyannikova I.V.* Novye metodiki bio-testirovaniya s ispol'zovaniem rastenij kress- salata (Lepidium sativum) dlya ekologicheskogo kontrolya okruzhayushchej sredy (New Bioassay Techniques Using Watercress Plants (Lepidium sativum) for Ecological Environmental Control. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnichskaya konferenciya “Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy–2016” (International Scientific and Technical Conference), Sevastopol, 24–27 October 2016, Book of Abstracts, P. 108.

2. *Ovsyannikova I.V. and Hajrullin R.M.* Novyj metod opredeleniya toksichnosti pochv, zagryaznyonnyh neft'yu i nefteproduktami (A new method for determining the toxicity of soils contaminated with oil and petroleum products). Energy and resource efficient environmentally friendly technologies and equipment. International Kosygin Forum-2019 "Modern tasks of engineering sciences", Proc. Conf., Moscow, 29 October–01 November 2019, pp. 257–259.

3. *Shulaev N.S*., *Pryanichnikova V.V., Kadyrov R.R., Ovsyannikova I.V., Bykovskij N.A., and Damineva R.M.* Elektrohimicheskaya ochistka gruntov s razlichnoj koncentraciej neftyanyh zagryaznenij pri ispol'zovanii edinogo istochnika elektricheskogo napryazheniya (Electrochemical cleaning of soils with different concentrations of oil pollution using a single source of electrical voltage. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov,* 2020, Vol. 10, No. 6, pp. 674–680.

4. *Metodika* opredeleniya toksichnosti pochv po vskhozhesti semyan i izmereniyu srednej dliny prorostka kress-salata (Lepidium sativum) FR.1.39.2016.24117.

5. *Znobishcheva N.O.*, *Galiev T.H., Hatmullina R.R., I.V. Ovsyannikova, and Islamutdinova A.A.* Izuchenie toksikologicheskogo sostoyaniya poverhnostnyh vod reki Ashkadar s ispol'zovaniem metodov biotestirovaniya (Study of the toxylogical status of surface waters of the Ashkadar river using biotesting methods. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy,* 2020, No. 2 (40), pp. 97–101.

6. *Urbah V.Yu.* Biometricheskie metody (statisticheskaya obrabotka opytnyh dannyh v biologii, sel'skom hozyajstve i medicine) (Biometric methods (statistical processing of experimental data in biology, agriculture and medicine). Moscow: Nauka, 1964, 415 p.

УДК 551.3:502.057 (477.75+551.4.038) DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-86-93

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ЭКЗОГЕННЫМИ ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА БЕРЕГАХ СЕВАСТОПОЛЯ ОТ М. ТЮБЕК ДО М. САРЫЧ

И.В. Агаркова-Лях

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: iva_crimea@mail.ru

Рассмотрена история изучения экзогенных геологических процессов на берегах Севастополя на протяжении XX – нач. XXI вв. Анализ трудов, опубликованных в XX в., показал пространственно-временную неравномерность проводимых изысканий и ограниченное количество специальных работ. С начала XXI в. резко возросло число исследований береговых экзогенных процессов в регионе, благодаря чему повысились их изученность и территориальный охват. В настоящее время в границах Севастополя сформирована сеть государственного и планируется организация субъектового мониторинга за опасными экзогенными геологическими процессами, где важное место занимают пункты наблюдений на морском побережье.

Ключевые слова: опасные экзогенные геологические процессы, морские берега, Крымская оползневая станция, наблюдательная сеть, государственный и субъектовый мониторинг.

Поступила в редакцию: 11.03.2022.

Введение. Значительная протяженность берегов Севастополя, составляющая около 160 км, определяет существенное влияние экзогенных геологических процессов на хозяйственную жизнь региона. На фоне стремительного освоения с конца XX в. приморских территорий и усиления антропогенной нагрузки на берега, здесь происходит резкая активизация экзогенных процессов. Ее результаты можно наблюдать у пгт. Кача и м. Толстый в виде «висящих» над обрывами построек; регулярных обвалов и камнепадов на дикие пляжи в районе м. Фиолент, м. Айя, пгт. Кача и др. Внезапность и катастрофичность этих процессов создает угрозу для жизни и деятельности человека. Залогом безопасности на побережье является ведение регулярных наблюдений за динамикой опасных экзогенных процессов и выявление причин их возникновения. В этой связи, тема настоящего исследования является весьма актуальной.

Цель статьи – рассмотреть историю изучения и организации наблюдений за экзогенными геологическими процессами на берегах Севастополя между м. Тюбек и м. Сарыч.

Материалы и методы. Источниками информации выступили: опубликованные официальные данные (документы Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым, Департамента природных ресурсов и экологии города Севастополя, государственного бюджетного учреждения города Севастополя «Экологический центр»); материалы научных исследований; архивные материалы Института минеральных ресурсов, Крымской гидрогеологической экспедиции и Государственного геологического предприятия «Крымгеология» за период 1983–1993 гг.; поисковая сеть Интернет; информационно-картографический ресурс «Google Планета Земля». Обработка полученной информации велась методами обобщения, сравнительно-географического и сравнительно-исторического анализа и синтеза.

Полученные результаты. Проведенные обобщение и анализ изученности экзогенных геологических процессов в береговой зоне региона на протяжении XX в. свидетельствуют о ее неравномерности в пространстве и во времени, а также о сравнительно небольшом количестве специальных (тематических) ис-

следований. Очевидные причины этого кроются в этапности хозяйственного освоения приморских территорий, существенной протяженности берегов и их различной доступности, а также длительном периоде ограничений посещаемости города (1939 – 1941 гг.; 1944 – серед. 70-х гг., 1984 –1995 гг.).

Так, одним из первых внимание исследователей привлек южнобережный участок между м. Айя и м. Сарыч, где проводились инженерно-геологические, инженерно-технические, геолого-тектонические, гидрогеологические и оползневые изыскания в связи с разрабатываемыми в конце XIX – начале XX вв. проектами строительства железной и автомобильной дорог [1, 2]. В этих прикладных работах основное внимание уделялось изучению оползней, затрагивавших не только морское побережье [3, 4]. Лишь в некоторых трудах кратко характеризовались и другие береговые процессы [5, 6].

В отличие от самого южного участка, остальные берега Севастополя начали изучаться лишь в 30-е – 40-е гг. XX в. Первое знакомство с ними произошло после выхода в свет монографий основателя отечественной школы береговедения – Зенковича В.П. [7, 8]. Проведение комплекса геолого-геоморфологических и гидродинамических исследований позволило Зенковичу В.П. осуществить первое районирование берегов Крыма, включая отрезок между мысами Лукулл и Сарыч [8]. При выделении береговых участков автор учитывал в том числе и характер экзогенных береговых процессов.

Довольно детальные исследования экзогенных процессов на берегах Севастополя велись в 60-е – 70-е гг. XX в. [9–12]. В ряде обобщающих работ делался акцент на анализе одного или комплекса экзогенных геологических процессов с их прогнозной оценкой [11–14].

В 80-е – нач. 90-х гг. XX в. профильные научные учреждения Крыма изучали в береговой зоне п-ова, включая Севастопольский регион, различные экзогенные геологические процессы (оползни, абразию, карст, сели и др.).

Научным трудом, подытожившим накопленные к началу XXI в. планетарные и региональные знания по развитию экзогенных процессов на берегах Мирового океана и Черного моря, стала монография Шуйского Ю.Д. [15]. Также в ней были охарактеризованы севастопольские берега и экзогенные геологические процессы.

За два прошедших десятилетия XXI в. появилось больше работ, в той или иной степени рассматривавших экзогенные береговые процессы в регионе, чем за весь XX в. Все они были объединены в три группы исследований. Первая, наиболее многочисленная группа публикаций, содержала самые общие характеристики экзогенных процессов в Севастопольском регионе, дополняя ими собственный предмет изучения (статьи Скребца Г.Н. и Агарковой-Лях И.В., 2004; Попова М.А., 2006; Агарковой-Лях И.В. и Скребца Г.Н., 2007; Ромащенко М.И. и др., 2011; Игнатова Е.И. и др., 2014; Попова М.А. и др., 2014; Игнатова Е.И. и др., 2016; Удовика В.Ф. и др., 2017; монографии Долотова В.В. и Иванова В.А., 2007; диссертации Орловой М.С, 2010 и Лазицкой Н.Ф., 2014). Их вторая группа была посвящена развитию экзогенных геологических процессов по всему Крымскому п-ову, однако их особенностям на севастопольских берегах уделялось незначительное внимание (монографии И.Ф. Ерыша и В.Н. Саломатина, 1999; Рудько и В.Н. Ерыша, 2006; статья и монография Клюкина А.А., 2005, 2007). В третьей группе работ описанию экзогенных процессов на берегах Севастополя отводилось главное или важное место (статьи Шуйского Ю.Д. и Выхованец Г.В, 2006; Агарковой-Лях И.В., 2007; Мысливца В.И., 2011; Новикова А.А. и др., 2014; Лугового Н.Н., 2016; Долотова В.В. и др., 2017; Агарковой-Лях И.В., 2017, 2019, 2020; Горячкина Ю.Н. и Федорова А.П., 2018, 2019; Горячкина Ю.Н и Долотова В.В., 2019; Горячкина Ю.Н. и др., 2020; Новикова А.А. и др., 2021).

Рост числа специальных исследований береговых экзогенных процессов в Севастопольском регионе свидетельствует о повышении научного интереса к

ним в связи с увеличением частоты опасных событий. Вместе с этим, выравнивается изученность береговых процессов на разных участках побережья. По видам исследуемых экзогенных процессов доминируют оползни и абразия как имеющие наибольшее развитие в регионе.

История создания сети наблюдений за экзогенными геологическими процессами на Крымском п-ове и в регионе Севастополя. Массовая активизация экзогенных геологических процессов и ряд катастрофических событий в Крыму в 1786, 1894, 1906–1907, 1915–1916 и 1921–1923 гг., определили актуальность формирования местной сети наблюдений. Для ведения регулярного мониторинга за опасными экзогенными геологическими процессами на территории п-ова, в июле 1930 г. была создана первая в СССР и в мире Крымская (Кучук-Койская) оползневая станция [16, 17]. Смелые геологи разместили здание оползневой станции и жилье для ее сотрудников в центральной части Кучук-Койского оползня – самого крупного в Крыму, чтобы иметь возможность постоянно наблюдать за ним.

Основными задачами оползневой станции были и остаются: картографирование и кадастрирование всех оползней Крыма; разработка методики и оптимальных видов работ для проведения регионального и локального мониторинга за оползнями и обуславливающими их геологическими процессами (абразией, эрозией, обвалами, подтоплением и режимом подземных вод) для установления главных причин и режимоформирующих факторов, их механизма развития и пространственно-временных прогнозов опасных экзогенных геологических процессов; апробация регионального мониторинга за опасными экзогенными геологическими процессами.

В первые годы работы станции в кадастр оползней Крыма были включены лишь 100 основных оползней Южнобережья. Мониторинг в региональном масштабе развернулся только во второй половине XX в., и к 1965 г. им был охвачен весь Крым. К настоящему времени в Кадастре оползней Крыма и под наблюдением находятся 1602 оползня (до 70% их приходится на ЮБК); потенциально и оползнеопасные территории; в Горном Крыму – более 100 обвальных и обвалоопасных участков, до 50 селеопасных водосборов; 840 км абразионно-обвального побережья Крыма [17]. За более чем 90 лет, прошедших с момента организации Крымской оползневой станции, ее сотрудниками собран ценный фактический материал, который помог в решении множества научных и прикладных задач на п-ове. Сегодня эти исследования продолжает Ялтинский участок мониторинга за опасными экзогенными геологическими процессами Крымской комплексной гидрогеологической партии государственного унитарного предприятия (ГУП) Республики Крым (РК) «Крымгеология».

До 2006–2008 гг. в границах Севастопольского региона Ялтинским отделением Крымской комплексной гидрогеологической партии ГУП РК велись следующие аэровизуальные, наземные визуальные, полуинструментальные и инструментальные наблюдения: за оползнями на всем протяжении от м. Лукулл до м. Константиновский; за обвалами и камнепадами у пгт. Кача, Балаклавы и м. Айя; за абразией и аккумуляцией в береговой части пгт. Кача и пос. Любимовка; за локальными и площадными подтоплениями в приустьевой части Качи [17] (рис. 1). Таким образом, основная часть регулярных полевых наблюдений была сосредоточена на Северной стороне Севастополя, а 2/3 берегов, фактически, находились вне зоны постоянного мониторинга, за исключением нескольких точек у Балаклавы и м. Айя.

Между тем, с начала 2000-х гг. финансирование региональных мониторинговых работ постепенно сокращалось, в результате чего в последние годы ими были охвачены лишь 3–6% оползней п-ова, расположенных на Южном берегу и частично – в Севастопольском регионе (всего около 40-50 оползней) [17].

Вместе с этим, активизация опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП) в Севастопольском регионе требовала организации здесь полноценной

сети регулярных наблюдений. Лишь в сентябре 2018 г., после резонансного июльского обвала на Северной стороне между м. Толстый и пляжем «Учкуевка», снесшего с обрыва жилую постройку садоводческого некоммерческого товарищества собственников недвижимости «Парус», на официальном сайте Департамента природных ресурсов и экологии Севастополя впервые появилась «Карта наблюдательной сети оползневых участков на территории города федерального значения Севастополя по состоянию на 1 сентября 2017 года» [18].



Рис. 1. Виды наблюдений за экзогенными геологическими процессами на берегах Севастополя до 2006–2008 гг. (составлена автором по материалам Ерыша И.Ф., 2008)
Fig. 1. Types of observations of exogenous geological processes on the shores of Sevastopol until 2006–2008 (compiled by the author based on the materials of Erysh I.F., 2008)

К настоящему времени на территории Севастополя сформирована сеть государственного мониторинга за опасными ЭГП. Основными его задачами являются: оценка современного состояния и проявления активности ЭГП; проведение плановых и оперативных инженерно-геологических обследований территорий и хозяйственных объектов, подверженных негативному воздействию опасных ЭГП; подготовка регламентных и оперативных материалов о состоянии и прогнозе активности ЭГП; актуализация и пополнение массивов данных Государственного мониторинга состояния недр по подсистеме «опасные ЭГП» по территориям субъектов Российской Федерации и Южного федерального округа.

Государственная опорная наблюдательная сеть (ГОНС) включает 10 пунктов наблюдения, работы по которым финансируются Федеральным агентством по недропользованию, а список утверждается приказом Департамента природных ресурсов и экологии города Севастополя. Ведение ежеквартальных дежурных (повторных) и плановых инженерно-геологических (ИГ) обследований по пунктам ГОНС осуществляет ГБУ Севастополя «Экоцентр» [19]. Регулярные ИГ обследования включают визуальные и фотометоды оценки морфомет-

рических, морфологических, динамических и кинематических характеристик ЭГП и последствий их воздействия на населенные пункты и хозяйственные объекты. В ходе проведения работ картируются такие показатели, как количество и площадь активных, активизировавшихся и вновь образовавшихся оползней; количество прошедших склоновых гравитационных процессов; величина смещения отдельных частей оползня.

В 2018 г. семь из десяти пунктов ГОНС располагались на побережье: «Качинский», «Балочный», «Любимовский большой», «Любимовский малый», «Учкуевский», «Фиолент-2», «Василевский» (все – оползни). С ноября 2019 г. к ним добавилась точка наблюдений «Мыс Коса Северная – Мыс Толстый». С 2020 г. Федеральным агентством по недропользованию рекомендовано размещать пункты ГОНС за пределами водоохранной зоны моря [19, 20].

Территориальная сеть субъектового мониторинга за опасными ЭГП (субъектовый мониторинг) на настоящий момент еще не создана. Она будет включать около ста точек наблюдения, расположенных в том числе в прибрежной зоне моря.

В рамках госзадания, по запросам граждан и исполнительных органов государственной власти, проводятся оперативные ИГ обследования участков, подверженных опасным ЭГП. Впоследствии эти участки могут быть включены в региональную субъектовую наблюдательную сеть за опасными ЭГП.

Создание собственной сети мониторинга представляет серьезный шаг на пути к обеспечению региональной безопасности, что позволит вести регулярные наблюдения за экзогенными геологическими процессами по всей территории региона, включая морское побережье, для предупреждения их развития по опасному или катастрофическому сценариям.

Заключение. Анализ научных работ XX – нач. XXI в., в которых рассматривались экзогенные геологические процессы в береговой зоне Севастополя, свидетельствует о значительном повышении интереса к этой теме вследствие смещения хозяйственной деятельности к побережью и активизации опасных экзогенных процессов. В настоящее время можно говорить об относительно равномерной изученности экзогенных процессов на всем протяжении береговой линии региона и доминировании среди них исследований оползней и абразии.

До 2006–2008 гг. Ялтинским отделением Крымской комплексной гидрогеологической партии ГУП РК велись наблюдения за оползнями, обвалами, камнепадами, абразией, аккумуляцией и подтоплением в пределах Северной стороны Севастополя, а также точечные наблюдения за обвалами и камнепадами у Балаклавы и м. Айя.

На данный момент на территории Севастополя сформирована сеть государственного мониторинга за опасными ЭГП, включающая 10 пунктов ГОНС, расположенных вне водоохранной зоны моря. Сеть субъектового мониторинга находится в стадии создания. Она охватит ЭГП, приуроченные к морскому побережью.

В рамках существующей сети наблюдений обобщение большого количества натурных данных и их многолетний ряд позволят выявить условия развития и механизмы активизации экзогенных геологических процессов в регионе с целью прогноза их активности и предотвращения опасных событий.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 121122300072-3 «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Левяковский И.Ф.* О современных геологических явлениях в южной России, произведенных действием воды // Журнал Мин-ва Нар. Просвещения. 1867. Ч. 133.

2. *Борисяк А.А.* Геологические исследования в юго-западной части Крымского полуострова // Изв. Геол. комитета. 1904. Т. 23. № 1. С. 18–21.

3. *Каракаш Н.И.* Оползни Южного берега Крыма // Тр. СПб о-ва естествоисп. 1912. Т. 43. Вып. 1. № 4.

4. *Мушкетов Д.И.* Оползни побережья Черного моря // Горный журнал. 1925. № 1.

5. *Добрынин Б.Ф.* Ласпи. Географический очерк // Крым. 1927. Вып. 1(3). С. 3–25.

6. *Пирогов К.П.* Гидрогеологические исследования на Южном берегу Крыма в районе Ласпи // Известия Всесоюзного геолого-разведочного объединения НКТП СССР. 1932. Т. 51. Вып. 18. С. 1–23.

7. *Зенкович В.П.* Берега Черного и Азовского морей. М.: Географиздат. 1958. 374 с.

8. *Зенкович В.П.* Морфология и динамика Советских берегов Черного моря. В 2 т. М.: АН СССР, 1958, 1960.

9. *Романюк О.С.* Пляжи Крыма, их генезис и перспективы практического использования: Автореф. дис. … канд. геогр. наук. Симферополь, 1968.

10. *Махаева Т.В.* К геоморфологии и динамике берегов Западного Крыма // Геология побережья и дна Черного и Азовского морей в пределах УССР. 1968. Вып. 2. К.: КГУ. С. 160–165.

11. *Шуйский Ю.Д.* Процессы и скорости абразии на украинских берегах Черного и Азовского морей // Известия АН СССР. Серия география. 1974. № 6. С. 108–117.

12. *Шуйский Ю.Д.* Питание обломочным материалом северо-западного и крымского районов шельфа Черного моря // В кн.: Исследование динамики рельефа морских побережий. М.: Наука,1979. С. 89–97.

13. *Прогноз* экзогенных геологических процессов на черноморском побережье СССР / Под ред. А.И. Шеко, В.С. Круподерова. М.: Недра, 1979. 239 с.

14. *Золотарев Г.С., Ерыш И.Ф.* Проблемы инженерной геологии и защиты Черноморского побережья и Горного Крыма // Инженерная геология. 1985. № 2. С. 61–71.

15. *Шуйський Ю.Д.* Типи берегів Світового океану. Одеса: Астропринт, 2000. 480 с.

16. *Ерыш И.Ф., Саломатин В.Н.* Оползни Крыма. В 2-ух частях. Ч. 1. История отечественного оползневедения. Симферополь: Апостроф, 1999. 248 с.

17. *Министерство* экологии и природных ресурсов Республики Крым. Доклад «О состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2016 году». Ижевск: ООО «Принт-2», 2017. 300 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://meco.rk.gov.ru/rus/file/doklad-o-sostoyanii-i-okhrane-okruzhayushhej-sredy-respubliki-krym-v-2016-godu.pdf (дата обращения: 20.11.2017).

18. *Департамент* природных ресурсов и экологии города Севастополя. Карта пунктов территориальной наблюдательной сети экзогенных процессов г. Севастополя на 01.09.2017 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ecosev.ru/images/monitoring/Karta_punktov_territorialnoy_nablyudat_seti_EGP.jpg (дата обращения: 23.01.2022).

19. *Государственное* бюджетное учреждение города Севастополя «Экологический центр». Информационный бюллетень о состоянии недр на территории города Севастополя в 2020 г. Вып. 3. 2021. 116 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ekocentr-sev.ru/documents/scan_153_7fa78b.pdf (дата обращения: 30.01.2022).

20. *Приказ* от 15.04.2020 № ПР/90 «Об утверждении реестра наблюдательной сети мониторинга опасных экзогенных геологических процессов на территории города Севастополя на 2020 год» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ecosev.ru/images/ПР_90.pdf (дата обращения: 07.02.2022)

HISTORY OF STUDYING AND ORGANIZING OBSERVATIONS OF EXOGENOUS GEOLOGICAL PROCESSES ON THE SHORES OF SEVASTOPOL FROM CAPE TYUBEK TO CAPE SARYCH

I.V. Agarkova-Lyakh

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The history of the study of exogenous geological processes on the shores of Sevastopol throughout the 20th – early 21st century is considered. Analysis of the works published in the 20th century showed the spatial and temporal unevenness of the carried-out research, as well as a limited number of special or thematic works. Since the beginning of the 21st century the number of studies of coastal exogenous processes in the region has sharply increased, due to which knowledge on the processes and their territorial coverage have increased. At present, a network of state and subject monitoring of hazardous exogenous geological processes has been formed on the territory of Sevastopol, in which coastal observation points are of importance.
Keywords: hazardous exogenous geological processes, seashores, Crimean landslide station, observation network, state and subject monitoring.

REFERENCES

1. *Levakovskiy I.F.* O sovremennykh geologicheskikh yavleniyakh v yuzhnoy Rossii, proizvedennykh deystviyem vody (On modern geological phenomena in southern Russia, produced by the action of water). *Zhurnal Min-va Nar. prosveshcheniya*, 1867, Part 133.

2. *Borisyak A.A.* Geologicheskiye issledovaniya v yugo-zapadnoy chasti Krymskogo poluostrova (Geological research in the southwestern part of the Crimean Peninsula). *Izv. Geol. Komiteta*, 1904, Vol. 23, No. 1. pp. 18–21.

3. *Karakash N.I.* Opolzni Yuzhnogo berega Kryma (Landslides on the Southern Coast of Crimea). *Tr. Spb o-va yestestvoisp.*, 1912, Vol. 43, Issue 1, No. 4.

4. *Mushketov D.I.* Opolzni poberezh'ya Chernogo morya (Landslides of the Black Sea coast). *Gornyy zhurnal,*1925, No. 1.

5. *Dobrynin B.F.* Laspi. Geograficheskiy ocherk (Laspi. Geographical sketch). *Krym.* 1927, Issue 1(3). pp. 3–25.

6. *Pirogov K.P.* Gidrogeologicheskiye issledovaniya na Yuzhnom beregu Kryma v rayone Laspi (Hydrogeological research on the southern coast of Crimea in the Laspi area). *Izvestiya Vsesoyuznogo geologo-razvedochnogo ob"yedineniya NKTP SSSR*, 1932, Vol. 51, Issue 18, pp. 1–23.

7. *Zenkovich V.P.* Berega Chernogo i Azovskogo morey (Coast of the Black and Azov Seas), Moscow: Geografizdat, 1958, 374 p.

8. *Zenkovich V.P.* Morfologija i dinamika Sovetskih beregov Chernogo morja (Morphology and dynamics of the Soviet coasts of the Black Sea), in 2 Vol., Moscow: AN SSSR, 1958, 1960.

9. *Romanjuk O.S.* Pljazhi Kryma, ih genezis i perspektivy prakticheskogo ispol'zovanija: Diss. kand. geogr. nauk (Beaches of the Crimea, their genesis and prospects of practical use. Cand. geogr. sci. thesis), Simferopol', 1968.

10. *Makhaeva T.V.* K geomorfologii i dinamike beregov Zapadnogo Kryma (To geomorphology and dynamics of the coast of the Western Crimea) / Geology of the coast and bottom of the Black and Azov Seas within the USSR), 1968, Issue 2, Kiev: KGU, pp. 160–165.

11. *Shujskij Yu.D.* Protsessy i skorosti abrazii na ukrainskikh beregakh Chernogo i Azovskogo morey (Processes and speeds of abrasion on the Ukrainian coast of the Black and Azov seas). *Izvestiya AN SSSR. Seriya geografiya,* 1974, No. 6, pp. 108–117.

12. *Shujskij Yu.D.* Pitanie oblomochnym materialom severo-zapadnogo i krymskogo rayonov shel'fa Chernogo morya (Food detrital material of northwest and Crimean districts of

the shelf of the Black Sea / Research of dynamics of a relief of sea coasts): Sb. statej, Moscow, Nauka, 1979, pp. 89–97.

13. *Prognoz* jekzogennyh geologicheskih processov na chernomorskom poberezh'e SSSR (The forecast of exogenous geological processes on the Black Sea coast of the USSR), Moscow: Nedra, 1979, 239 p.

14. *Zolotarev G.S., Erysh I.F.* Problemy inzhenernoj geologii i zashhity Chernomorskogo poberezh'ja i Gornogo Kryma (Problems of engineering geology and protection of the Black Sea coast and Mountain Crimea). *Inzhenernaja geologiya,* 1985, No. 2, pp. 61–71.

15. *Shujskij Yu.D.* Tipi beregiv Svitovogo okeanu (Types of coast of the World Ocean), Odesa: Astroprint, 2000, 480 p.

16. *Erysh I.F., Salomatin V.N.* Opolzni Kryma (Landslides of the Crimea), Part 1, Istoriya otechestvennogo opolznevedeniya, Simferopol': Apostrof, 1999, 248 p.

17. http://meco.rk.gov.ru/rus/file/doklad-o-sostoyanii-i-okhrane-okruzhayushhej-sredy-respubliki-krym-v-2016-godu.pdf

18. http://ecosev.ru/images/monitoring/Karta_punktov_territorialnoy_nablyudat_seti_EGP.jpg

19. http://www.ekocentr-sev.ru/documents/scan_153_7fa78b.pdf

20. https://ecosev.ru/images/ПР_90.pdf

УДК 574.474/552:504.73./581.524.1 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-94-104

ДИНАМИКА АЛЛЕЛОПАТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПОЧВЫ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ С МОНОДОМИНАНТНЫМ ДРЕВОСТОЕМ ПОСЛЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

В.Г. Щербина

Филиал Института природно-технических систем,
РФ, г. Сочи, Курортный проспект, 99/18
E-mail: v.g.scherbina@bk.ru

Проведена оценка динамики аллелопатических эффектов почвы на протяжении семи месяцев вегетационного сезона после моделирования разовой рекреационной нагрузки в семи лесных экосистемах влажных субтропиков Сочинского Причерноморья. По показателю аллелопатической активности почвы и индексу относительного аллелопатического эффекта прослежена сезонная динамика стимулирования и ингибирования ростовых процессов биотеста, в зависимости от наличия определенного древесного вида, величины разовой рекреационной нагрузки и времени, прошедшего после антропогенного воздействия. Составлены ряды лесных экосистем по величине устойчивости эдафических условий к рекреационному воздействию и устойчивости к внедрению новых видов под полог древостоя на диапазоне рекреационных нагрузок 1,39–8,33 чел/га.
Ключевые слова: Сочинское Причерноморье, влажные субтропики, лесные экосистемы, монодоминантный древостой, рекреационная нагрузка, почва, аллелопатический эффект, сезонная динамика.

Поступила в редакцию: 24.02.2022.

Введение. Динамика количественных характеристик накопления растительных метаболитов в природной среде широко изучается [1–6]. Выявлена связь с сезонными изменениями микробиальной активности, динамикой подстилки, ветоши, биомассой травянистых форм, с сезонными изменениями температуры, осадков и пр. Однако изменения аллелопатических эффектов в антропогенно–нарушенных, в том числе рекреационных лесах, остается малоизученным. Для Юга России особую рекреационную ценность представляют леса влажных субтропиков, насыщенные древними реликтовыми видами [7], обладающие широким спектром концентраций вторичных метаболитов [8] и высокой рекреационной аттрактивностью и, следовательно, требующие детального изучения для возможности нормирования нагрузок, поддержания видового фонда, стабильности и рекреационной устойчивости экосистем.

Цель данной работы заключалась в оценке динамики аллелопатических эффектов почвы на протяжении вегетации в лесных экосистемах влажных субтропиков Сочинского Причерноморья после моделирования рекреационной нагрузки.

Материалы и методы. Фактический материал собирался на участках склонов юго-западной экспозиции в бассейнах 11 рек (Шепси, Шахе, Киет, Уч-Дере, Псахе, Восточный и Западный Дагомыс, Сочи, Хоста, Большая Хоста, Мзымта), в лесных сообществах с монодоминантным древостоем: *Castanea sativa* Mill., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus pubescens* Willd., *Buxus colchica* Pojark, *Fagus orientalis* Lipsky, *Carpinus betulus* L., *Taxus baccata* L.

Серия полевых экспериментов включала: 1) моделирование рекреационных нагрузок (вытаптывание), 2) отбор почвенных проб через интервалы времени, 3) определение по почвенным пробам объемной массы почвы и динамики аллелопатической активности.

Контролем служили прилегающие участки территории с визуальным отсутствием повреждений высших растений и средней объемной массой (по 5 пробам) верхнего горизонта почвы на учетной площадке $\leq 0{,}9$ г/см^3.

Моделирование нагрузок проводилось в начале апреля 2021 г. по методике «Моделирования шаговой нагрузки» [9],

с параметрами: продолжительность рекреационного сезона 1200 часов [10]; удаленность от ближайших стволов ≥ 2 м; 5 вариантов нагрузки (1,39; 2,78; 4,17; 6,25; 8,33 чел/га) [11]; 3–кратная повторность; объем воды для дождевания по многолетним данным в апреле месяце [12] составлял 1,7 л.

Почвенные пробы (керны) брались универсальным цилиндрическим буром врезного типа (корнерезом) [13] в верхнем горизонте почвы (010 см) методом конверта (5 - кратная повторность).

Для оценки динамики аллелопатической активности почвы первый этап отбора почвенных проб проводился на 2–5 сутки ($\bar{x}$ = 3), второй – на 14–16 сутки ($\bar{x}$ = 15), третий – на 28–32 сутки ($\bar{x}$ = 30), начиная с 80 суток (четвертый этап; с конца июня), пробы брались с шагом 5 суток до конца октября – по 210 сутки.

Всего, сезонная динамика (7 месяцев) в одной экосистеме и в одном варианте нагрузки оценивалась по 450 пробам.

Пробы на объемную массу почвы отбирались в четыре этапа ($\bar{x}$, сутки): 3, 80, 120, 180. Всего, сезонная динамика в одной экосистеме и в одном варианте нагрузки оценивалась по 120 пробам.

Аллелопатическая активность почвы (I_{50}) оценивалась традиционным методом влияния водных вытяжек (1:1,5) на биотест – семян редьки посевной (*Raphanus sativus* L.) [1], при допустимом отклонении в результатах повторности одной аналитической пробы от среднего ±8–9%.

Всего, в одной экосистеме и варианте нагрузки одного этапа было проанализировано по 9000 семян биотеста.

Выраженность аллелопатического действия рассчитывалась по индексу относительного аллелопатического эффекта – I_{RAE} (1): при отрицательном значении I_{RAE} – проявляется ингибирующий эффект, при положительном – стимулирующий [6, 14].

$$I_{RAE} = \frac{I_O - I_C}{I_C} \times 100, \qquad (1)$$

где I_O – проросшие семена на вытяжке; I_C – проросшие семена на дождевой воде.

Статистический анализ фактического материала выполнялся с использованием стандартных методов оценки вариационных рядов генеральных совокупностей, включая метод частной корреляции [15].

Полученные результаты. В контрольных условиях (относительно ненарушенных) аллелопатическая активность почвы, варьируя с апреля по октябрь в диапазоне 7,8–71,5% (рис. 1), характеризует существенную зависимость I_{50} от времени вегетации, объясняя около 63% варьирования значений этого параметра применительно ко всем рядам данных (табл. 1).

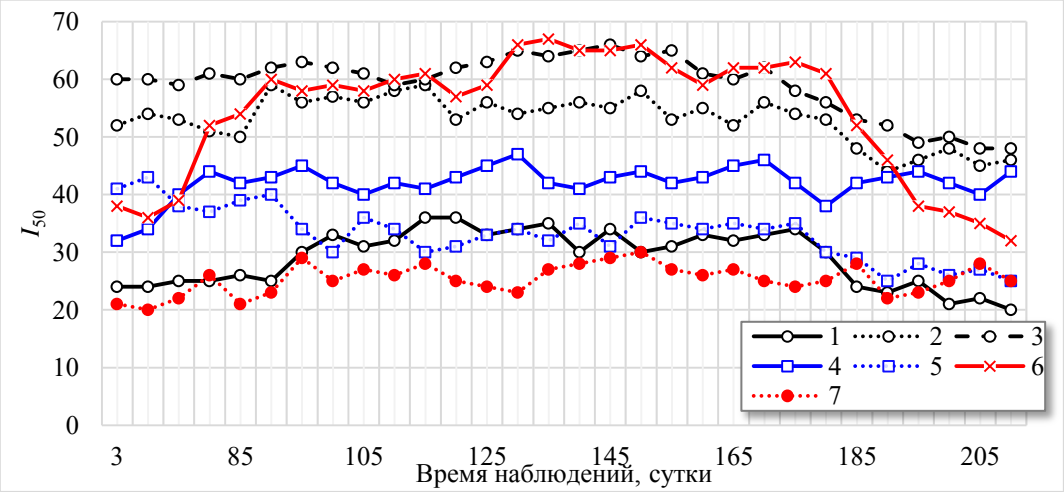


Рис. 1. Временная динамика в контрольных условиях всхожести семян биотеста (I_{50}) при видовом составе древостоя: 1 – *Castanea sativa,* 2 – *Quercus pubescens,* 3 – *Quercus petraea,* 4 – *Buxus colchica,* 5 – *Fagus orientalis,* 6 – *Carpinus caucasica,* 7 – *Taxus baccata*

Fig. 1. Temporal dynamics under control conditions of germination of biotest seeds (I_{50}) with the species composition of the forest stand: 1 – *Castanea sativa,* 2 – *Quercus pubescens,* 3 – *Quercus petraea* 4 – *Buxus colchica,* 5 – *Fagus orientalis,* 6 – *Carpinus caucasica,* 7 – *Taxus baccata*

Таблица 1. Общая характеристика всхожести семян биотеста в контрольных условиях

Древостой (вид)	N	$\bar{x}$	μ_{min}	μ_{max}	σ	R^2
Castanea sativa	450	29,0	20	36	5,95	69,4
Quercus petrea	450	53,1	44	59	4,70	66,1
Quercus pubescens	450	59,3	48	66	4,28	73,5
Buxus colchica	450	42,0	32	47	10,03	49,5
Fagus orientalis	450	33,2	25	43	5,23	63,6
Carpinus caucasica	450	54,3	32	67	48,54	86,1
Taxus baccata	450	25,3	20	30	4,95	34,7

N – число полевых проб; $\bar{x}$ – среднее арифметическое всхожести семян биотеста (I_{50}); μ_{min}, μ_{max} – предельные значения генеральной совокупности; σ – дисперсия; R^2– коэффициент детерминации (%)

Для листопадных древесных видов меньшие величины ингибирования (соответствует I_{50} с большими значениями) отмечаются в летний период, повышаясь к концу сезона вегетации и в межсезонье. Это объясняется увеличением количества осадков, пула органики и смены вымываемых органических кислот и фенольных соединений из опадающих листьев, приводя к стойкому накоплению физиологически активных соединений в верхнем горизонте почвы [2, 5, 6]. Исключения представляют вечнозеленые древесные сообщества с эдификаторной ролью *Buxus colchica* и *Taxus baccata.* Наличие кожистой листвы (хвои) и более равномерная их смена в течении годичной фенологии, обеспечивает растянутую во времени деструкцию опада и подстилки. Большие величины интенсивности экстракции колинов из опавших ассимиляционных пластинок отмечаются в весенний период (зимне–весенний [3]), составляя по коэффициенту вариации увеличение соответственно на 50,8–53,2 и 3,1–5,8% (R^2 = 92,3 и 95,1%).

Большие средние величины всхожести биотеста (I_{50}) в экосистемах с эдификаторами *Quercus petrea* и *Quercus pubescens* ($\bar{x}$ = 53,1–59,3) можно объяснить известным слабым промывным режимом почвы в данных экосистемах и значительным накоплением подстилки [1, 16, 17].

Экосистемы с *Carpinus caucasica* характеризуются также большей влажностью верхнего горизонта почвы и особенностями слоя рыхлого листового опада (скручивание листовых пластинок при подсыхании), способствующие ускорению экстракции колинов (коэффициент вариации возрастает на 80,2%) и полному или почти полному их разрушению к середине лета.

В целом, полученные результаты в контрольных условиях согласуются с почвоулучшающей функцией анализируемых сообществ и отдельными временными этапами влияния стимулирующего действия метаболитов ризосферных организмов на ростовые процессы растительных форм [4, 5, 18–20].

В зоне влажных субтропиков рекреационное уплотнение верхних горизонтов почвы сопровождается изменением физических характеристик почвы и интенсивностью протекающих биохимических процессов [10, 11, 21]. Многими авторами отмечается вариабельность динамики величины токсичности [2, 3, 6], что объясняется ритмом сезонной и суточной активности микрофлоры. Поэтому для общих ценотических оценок предлагается отталкиваться от средних показателей токсичности почвы. Полученные результаты динамики за вегетационный период (рис. 2, табл. 2) подтверждают зависимость величин аллелопатических эффектов от рекреационной нагрузки: чем больше эдафические условия отклоняются от контрольных значений под антропогенным воздействием, тем больше поступает в среду биологически активных веществ.

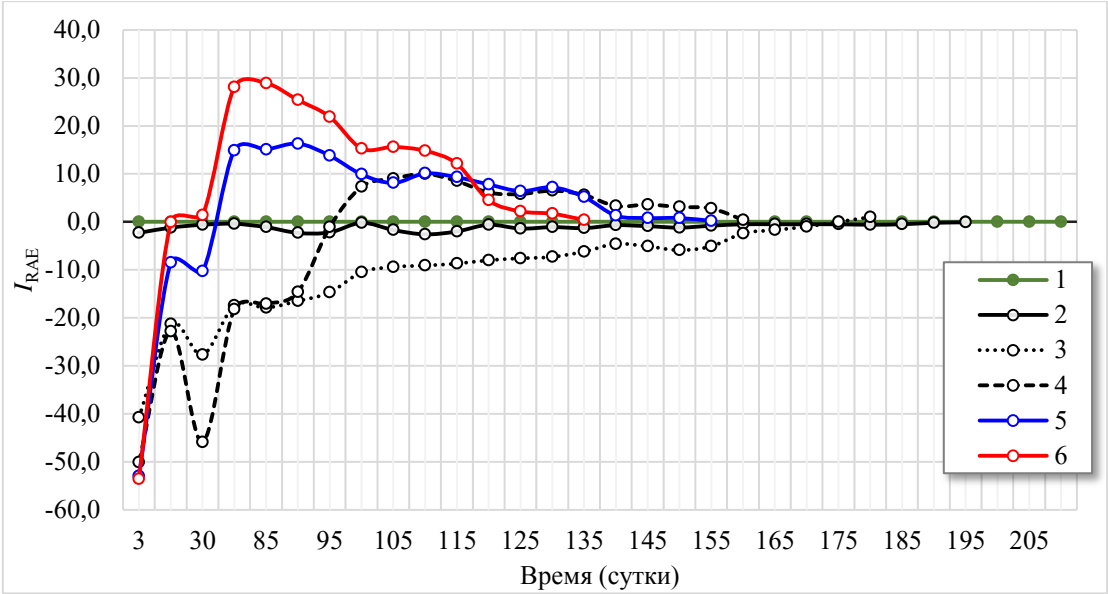


Рис. 2. Динамика I_{RAE} в лесных экосистемах после разовой рекреационной нагрузки (чел/га): 1 – 0,00 (контроль); 2 – 1,39; 3 – 2,78; 4 – 4,17; 5 – 6,25; 6 – 8,33
Fig. 2. Dynamics of I_{RAE} in forest ecosystems after a single recreational load (person/ha): 1 – 0,00 (control); 2 – 1,39; 3 – 2,78; 4 – 4,17; 5 – 6,25; 6 – 8,33

Таблица 2. Средние и предельные значения индекса относительного аллелопатического эффекта (I_{RAE}) на диапазоне 80–210 суток, без учета контроля

Эдификатор (вид)	Рекреационная нагрузка (чел/га)				
	1,39	2,78	4,17	6,25	8,33
Castanea sativa	-1,0 (-3,5 – -0,1)	-6,2 (-15,2 – 0,8)	1,4 (-16,0 – 8,4)	4,0 (1,1 – 7,5)	9,3 (1,6 – 18,5)
Quercus petrea	-1,0 (-5,0 – -0,1)	-6,6 (-10,4 – 0,9)	2,1 (-11,0 – 9,3)	11,0 (1,3 – 28,4)	13,2 (1,2 – 32,1)
Quercus pubescens	-0,7 (-3,3 – -0,1)	-6,8 (-16,3 – 2,9)	0,8 (-18,0 – 8,5)	10,8 (1,1 – 34,5)	26,7 (5,7 – 60,5)
Buxus colchica	-0,6 (-3,5 – -0,1)	-7,1 (-18,0 – 1,5)	2,7 (-20,0 – 15,7)	9,4 (1,1 – 18,0)	18,0 (3,8 – 26,1)
Fagus orientalis	-1,2 (-4,1 – -0,1)	-9,3 (-31,0 – 3,6)	2,0 (-26,0 – 17,0)	11,9 (1,6 – 18,2)	21,4 (4,5 – 31,1)
Carpinus caucasica	-1,5 (-4,0 – -0,2)	-10,4 (-32,4 – 4,0)	2,9 (-13,7 – 12,0)	4,3 (1,3 – 10,6)	15,3 (2,3 – 27,7)
Taxus baccata	-1,1 (-3,2 – -0,1)	-5,9 (-14,0 – 1,1)	-3,1 (-33,0 – 8,8)	14,0 (1,3 – 26,1)	21,0 (8,0 – 29,4)

Резкое увеличение содержание колинов в первые несколько суток после эдафического стресса подтверждается нашими исследованиями I_{RAE}, регистрируя ингибирование прорастания биотеста во всех лесных экосистемах. Фактор аллелопатии, варьируя по индексу I_{RAE} в среднем от -2,3 до -53,6 относительно контрольных условий, имеет прямую связь с величиной моделируемой рекреационной нагрузки, завися от биоэкологических особенностей древесного эдификатора лесной экосистемы. Более значительные ингибирующие аллелопатические эффекты выражены в экосистемах с *Carpinus caucasica* (I_{RAE} = -6,0 – -70,0; $\bar{x}$ = -55,9) и *Fagus orientalis* (I_{RAE} = -73,4 – -5,3; $\bar{x}$ = -57,5).

Уменьшение содержания колинов через 15 суток после начала сезонного эксперимента подтверждается полученной фитотоксичностью почвы, снижающейся в 3,5–4,1 раза с обратной зависимостью от рекреационной нагрузки.

По данным [22] к 30 суткам в вегетативных экспериментах происходит уве-

личение содержания органического углерода (колинов), предположительно, за счет разложения остатков микроорганизмов в ходе сукцессионных смен их сообществ, а также накопления метаболитов микроорганизмами. По нашим данным значения I_{RAE} увеличиваются с усилением ингибирующих свойств, с большими величинами при нагрузке 4,17 чел/га. В сообществах с высокой метаболической активностью при значительном рекреационном воздействии (≥ 6,25 чел/га) количество колинов снижается ниже показателей контрольных условий, приводя к проявлению стимулирующих свойств в экосистемах с *Quercus petrea* (I_{RAE}= 28,4–32,1), *Quercus pubescens* (I_{RAE}= 34,5–60,5), *Carpinus caucasica* (I_{RAE}= 10,6–27,7), *Fagus orientalis* (I_{RAE}= 15,7).

В последующий временной диапазон использование микроорганизмами остатков доступных органических веществ ведет к снижение концентрации колинов до уровня значительно ниже, чем в контрольных условиях, проявляя в течение 5–75 суток положительное воздействие на ростовые процессы биотеста в прямой зависимости от рекреационной нагрузки. На 185 сутки стимулирующие свойства колинов уже не регистрируются. Ингибирующие свойства при 1,39 чел/га отслеживаются по 190–200 сутки.

Можно предположить, что изменения в сезонном содержании колинов, проявляемое в величине ингибирования или стимулирования, связано с чередованием аэробных и анаэробных условий, приводящее к снижению фитотоксичности, со снижением пула органики и, соответственно, временными (сукцессионными) изменениями в качественном и количественном составе микроорганизмов ризосферы [4, 23], а также с промывным режимом почвы [16].

Во всех анализируемых экосистемах после нагрузки происходит самовосстановление аллелопатического режима до контрольных значений I_{RAE} (табл. 3), находясь в обратной тесной связи (94,3–99,7%) с величиной моделируемого рекреационного воздействия. Составляя, в зависимости от древесного вида, диапазон времени самовосстановления от 120–140 суток (при нагрузке 8,33 чел/га) до 187–203 суток (при 1,39 чел/га). Статистические характеристики временных рядов не перекрываются, характеризуя достоверное статистическое отличие между ними при значимости < 0,05 (t = 2,85).

Таблица 3. Время (сутки) восстановления I_{RAE} до контрольных значений

Эдификатор (вид)	Рекреационная нагрузка (чел/га)					R^2
	1,39	2,78	4,17	6,25	8,33	
Castanea sativa	203,3	185,0	161,7	158,3	140,0	96,4
Quercus petrea	193,3	186,7	165,0	143,3	125,0	97,7
Quercus pubescens	196,7	183,3	166,7	146,7	123,3	98,9
Buxus colchica	198,3	181,7	158,3	138,3	121,7	99,7
Fagus orientalis	191,7	180,0	143,3	141,7	118,3	94,3
Carpinus caucasica	186,7	165,0	146,7	140,0	120,0	97,8
Taxus baccata	201,7	188,3	165,0	151,7	131,7	99,3

Представленные на рис. 3 результаты динамики I_{RAE} после рекреационной трансформации почвы, отражают вариацию относительных аллелопатических эффектов в зависимости от видовых особенностей древесного эдификатора экосистем, степени рекреационной нарушенности эдафических условий и временем, прошедшего после нагрузки.

В экосистемах на функциональном диапазоне рекреационного изменения объемной массы почвы (≤ 1,19 г/см^3) водорастворимые колины суммарно за сезон проявляют ингибирующие свойства с высокой полиномиальной зависимостью (R^2 = 0,97–0,99, при p = 0,95). Значительные отличия проявляются на начальном этапе усиления трансформации почвы, т.е. при переходе по средним значениям объемной массы почвы от 0,92 до 1,06 г/см^3, с большей интенсивностью возрастая в экосистемах с *Castanea sativa* (в 13,5 раз). Меньшие изменения регистрируются в сообществах с

Quercus pubescens и *Fagus orientalis* (увеличение в 8,8 раз), *Quercus petraea* и *Carpinus caucasica* (8,3 раза), *Buxus colchica* и *Taxus baccata* (7,1 раза).

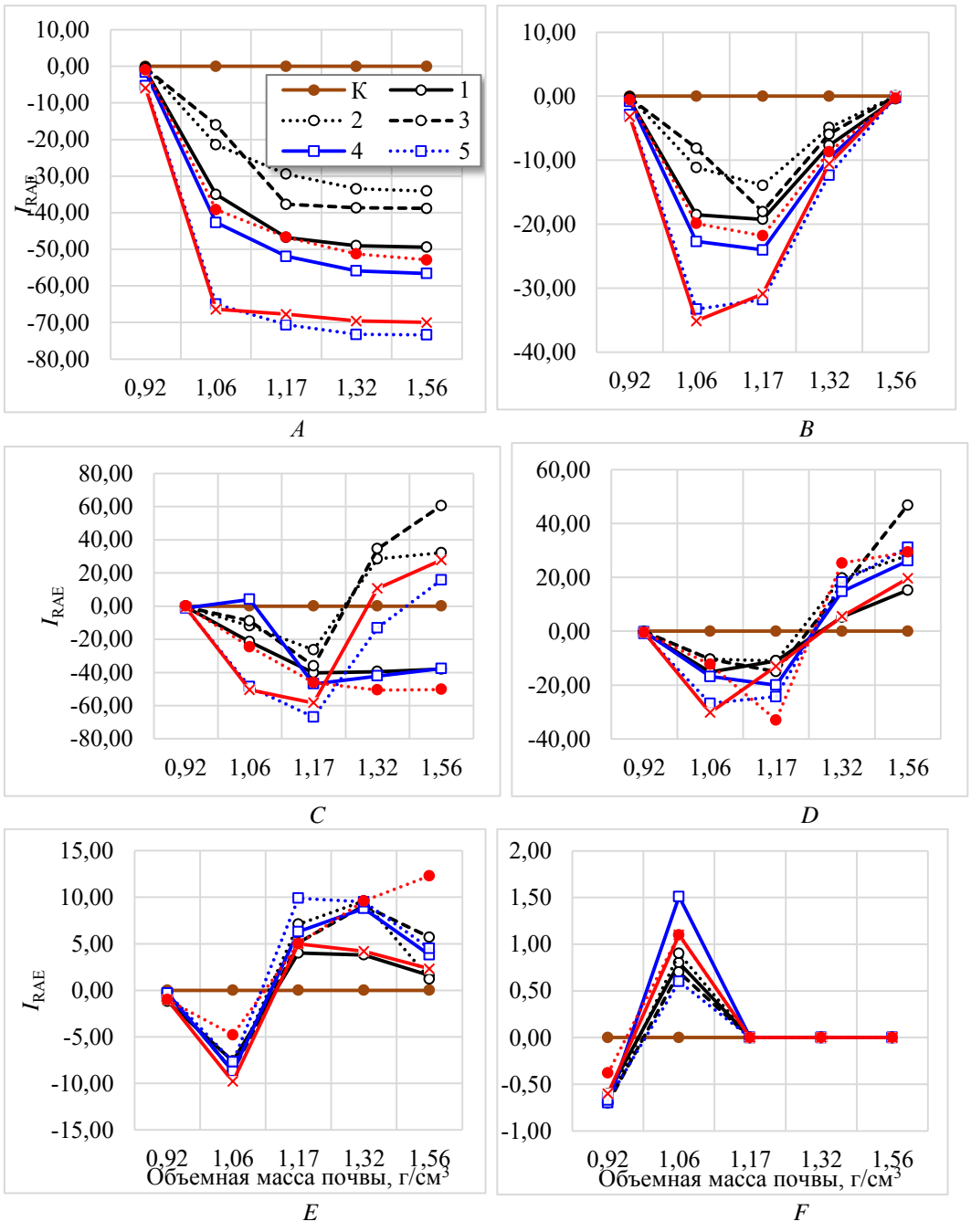


Рис. 3. Соотношение между аллелопатическим эффектом на временном интервале (*A* – 3 суток, *B* – 15 суток, *C* – 30 суток, *D* – 80 суток, *E* – 120 суток, *F* – 180 суток) с плотностью почвы в экосистемах: К – контроль по каждому виду, 1 – *Castanea sativa,* 2 – *Quercus pubescens,* 3 – *Quercus petraea,* 4 – *Buxus colchica,* 5 – *Fagus orientalis,* 6 – *Carpinus caucasica,* 7 – *Taxus baccata*

Fig. 3. Correlation between the allelopathic effect on the time interval (*A* – 3 days, *B* – 15 days, *C* – 30 days, *D* – 80 days, *E* – 120 days, *F* – 180 days) with soil density in ecosystems: K – control for each species, 1 – *Castanea sativa*, 2 – *Quercus pubescens*, 3 – *Quercus petraea*, 4 – *Buxus colchica*, 5 – *Fagus orientalis*, 6 – *Carpinus caucasica*, 7 – *Taxus baccata*

В диапазоне пессимальных рекреационных изменений объемной массы почвы (1,20–1,66 г/см^3) в целом проявляется стимулирующее действие колинов. Исключение регистрируется только при 1,20–1,44 г/см^3 ($\bar{x}$ = 1,32 г/см^3) с незначительным ингибированием в экосистемах с эдификатором *Castanea sativa* (–1,1) и *Carpinus caucasica* (–0,5). Большие средние величины характерны для представителей рода *Quercus*: *Quercus petraea* (6,6) и *Quercus pubescens* (4,2). По мере снижения формируется ряд: *Taxus baccata* (3,8), *Fagus orientalis* (3,2), *Carpinus caucasica* и *Buxus colchica* (1,4), *Castanea sativa* (–0,2). Полученный ряд согласуется и дополняет ранние исследования по устойчивости древесных видов в рекреационных условиях [8].

Снижение фитотоксичности при значительном рекреационном уплотнении почвы можно объяснить условиями слабой насыщенности органическими соединениями [17] и большей степенью потери активности тормозителя при большем развитии анаэробных условий [22].

Полученные в исследованиях результаты по видовой специфичности древостоя при проявлении аллелопатии подтверждают исследования в природной среде определяющего влияния вида при модификации аллелопатической среды внешними условиями [1, 3, 4].

Для объективной оценки характера и силы связи между парами переменных «объемная масса почвы» – «аллелопатический эффект» и «рекреационная нагрузка» – «аллелопатический эффект», применялся частный коэффициент корреляции, с нивелированием эффекта временных вариаций в ходе сезонной динамики (рис 4).

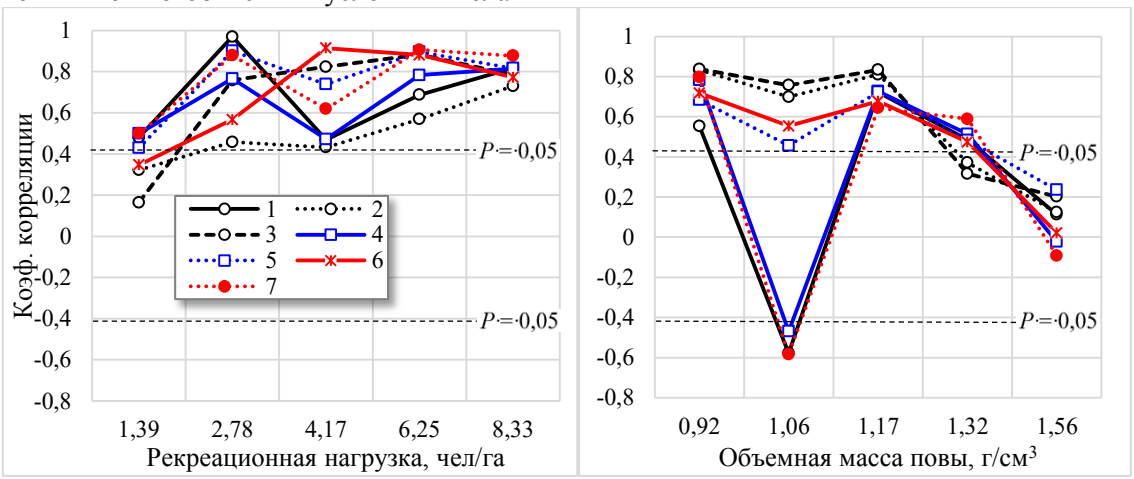


Рис. 4. Корреляционная связь аллелопатических эффектов с рекреационной нагрузкой (*A*) и объемной массой почвы (*B*) в экосистемах: 1 – *Castanea sativa,* 2 – *Quercus pubescens,* 3 – *Quercus petraea,* 4 – *Buxus colchica,* 5 – *Fagus orientalis,* 6 – *Carpinus caucasica,* 7 – *Taxus baccata*

Fig. 3. Correlation of allelopathic effects with recreational load (*A*) and bulk soil mass (*B*) in ecosystems: 1 – *Castanea sativa,* 2 – *Quercus pubescens,* 3 – *Quercus petraea,* 4 – *Buxus colchica,* 5 – *Fagus orientalis,* 6 – *Carpinus caucasica,* 7 – *Taxus baccata*

Полученные коэффициенты, при числе степеней свободы *df* (*n* – 2) = 18 и табличном уровне значимости $r_{табл\ 0,05}$ = 0,42, $r_{табл\ 0,01}$ = 0,54, характеризуют наличие тесной связи аллелопатических эффектов с объемной массой почвы на диапазоне плотности 0,86–1,19 г/см^3. Подтверждая превалирование аэробных условий в диапазоне допустимого рекреационного воздействия, а также указывая на незначительное отклонение от нормы восстановленных соединений и аминокислот в зоне ризосферы [1].

Более тесная достоверная связь регистрируется между аллелопатией и рекреационной нагрузкой, подтверждая ранее полученные результаты [21].

Заключение. Анализируемые лесные экосистемы в течение вегетационного сезона отличаются вариацией аллелопатического режима, связанного с биоэкологическими свойствами сообщества, определяемые видовой принадлежностью древесного эдификатора. По величине аллелопатической активности формируются ряды экосистем по степени снижения: *Quercus pubescens > Carpinus caucasica > Quercus petrea > Buxus colchica > Fagus orientalis > Castanea sativa > Taxus baccata*.

В рекреационных экосистемах с монодоминантным древостоем, в зависимости от наличия определенного древесного эдификатора (растения-акцептора), величины разовой рекреационной нагрузки и времени, прошедшего после антропогенного воздействия, аллелопатические эффекты свободного органического вещества (колинов) в эдафической среде взаимодействия растений могут проявлять, как стимулирование, так и ингибирование ростовых процессов.

Время восстановления аллелопатического режима, имея тесную сопряженность с рекреационной нагрузкой, может характеризовать величину устойчивости эдафической составляющей лесных экосистем к рекреационному воздействию, формируя ряд: *Castanea sativa > Taxus baccata > Buxus colchica > Quercus pubescens > Quercus petrea > Fagus orientalis > Carpinus caucasica.*

Величина и направление аллелопатических эффектов может отражать устойчивость экосистем после разовой рекреационной нагрузки к внедрению новых видов под полог древостоя. После нагрузки 1,39 чел/га устойчивость сохраняется выше контрольных значений во всех экосистемах на протяжении анализируемых 210 суток. С увеличением нагрузки формируются ряды:

2,78 чел/га – *Carpinus caucasica > Fagus orientalis > Taxus baccata > Castanea sativa > Quercus petrea > Buxus colchica > Quercus pubescens;*

4,17 чел/га – *Fagus orientalis > Carpinus caucasica > Taxus baccata > Buxus colchica > Castanea sativa > Quercus pubescens > Quercus petrea;*

6,25 чел/га – *Castanea sativa > Buxus colchica > Taxus baccata > Fagus orientalis > Carpinus caucasica > Quercus petrea > Quercus pubescens*;

8,33 чел/га – *Quercus pubescens > Castanea sativa > Buxus colchica > Taxus baccata > Quercus petrea > Fagus orientalis > Carpinus caucasica*.

Полученные результаты необходимы для накопления теоретической базы по участию аллелопатии в эндогенном механизме устойчивости трансформированных биологических сообществ и протекающих восстановительных процессов в лесных экосистемах после снятия рекреационной нагрузки, что, в прикладном аспекте, необходимо учитывать при планировании или реконструкции рекреационных зон, разработке эффективных стратегий контроля за вторжениями новых видов в лесные сообщества.

Работа выполнена в рамках гос. задания по теме № АААА–А16–116012510144–6 «Совершенствование механизма управления природопользованием с целью обеспечения эколого–экономической безопасности функционирования индустрии туризма».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гродзинский А.М.* Аллелопатия в жизни растений и их сообществ. Киев: Наукова думка, 1965. 198 с.

2. *Головко Е.А., Биляновская Т.М., Воробей И.И.* Аллелопатия культурних растений в аспекте проблем агрофитоценологии // Физиология и биохимия культурних растений. 1999. Т. 31. № 2. С.103–113.

3. *Матвеев Н.М.* Аллелопатия как фактор экологической среды. Самара: Самар. кн. изд-во, 1994. 206 с.

4. *Иванов В.П.* Растительные выделения и их значение в жизни фитоценозов. М.: Наука, 1973. 294 с.

5. *Юрчак Л.Д.* Алелопатія в агробіоценозах ароматичних рослин. К.: Фітосоціоцентр, 2005. 411с.

6. *Biotic* interactions in a Mediterranean oak forest: role of allelopathy along phenological development of woody species / H. Hashoum, M. Santonja, T. Gauquelin et al. // European Journal of Forest Research. 2017. № 136, P. 699–710. DOI: 10.1007/s10342-017-1066-z.

7. *Литвинская С.А., Лозовой С.П.* Памятники природы Краснодарского края. Краснодар: Периодика Кубани, 2005. 352 с.

8. *Щербина В.Г.* Аллелопатическая напряженность биотопов в лесных экосистемах влажных субтропиков // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 1 (43). С. 95–106. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-95-106.

9. *Временная методика* определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневного отдыха и временные нормы этих нагрузок. М.: ЦБНТИ лесхоза, 1987. 34 с.

10. *Ивонин В.М.* Рекреология. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. 240 с.

11. *Ивонин В.М., Авдонин В.Е., Пеньковский Н.Д.* Рекреационная экология горных лесов российского Причерноморья. Краснодар: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 271 с.

12. *Количество осадков* и дождливых дней. Климат Сочи. Режим доступа URL:https://pogoda33.ru/Сочи (дата обращения: 27.02.2021).

13. *Инструмент* для извлечения тонких корней деревьев, растений / С.В. Закамский, В.А. Закамский; опубл. 23.03.2013; Патент № A01B1A01G23.

14. *Phenolics* of the understory shrub Cotinus coggygria influence Mediterranean oak forests diversity and dynamics / J. Gavinet, M. Santonja, V. Baldy et al. // Forest Ecology and Management. 2019. №. 441. P. 262270

DOI: 10.1016/j.foreco.2019.03.049.

15. *Рокицкий П.Ф.* Биологическая статистика. Минск: Высшая школа, 1964. 328 с.

16. *Федотов Г.Н., Горепекин И.В., Позднякова А.Д.* Взаимосвязь предыстории использования и химических свойств почв с их аллелотоксичностью // Почвоведение. 2020. № 3. С. 379–386. DOI: 10.31857/S0032180X2003003X.

17. *Гродзинский А.М., Богдан Г.П., Головко Э.Я.* Аллелопатическое почвоутомление. К: Наукова думка, 1979. 248 с.

18. *Булыгин Н.Е.* Древесные растения местной флоры в урбанофитоценозах Санкт-Петербурга // Бюл. ГБС. 1995. Вып. 172. С. 37.

19. *Головко Э.А., Горобец С.А., Яхно В.С.* Роль микроорганизмов в субстратоутомлении // Роль токсинов растительного происхождения в аллелопатии. Киев: Наукова думка, 1983. С. 1029.

20. *Чайлахян М.Х.* Метаболиты микробов как стимуляторы роста и развития высших растений // Применение антибиотиков в растениеводстве. Ереван, 1962. С. 113–121.

21. *Щербина В.Г.* Влияние рекреационного воздействия в лесных сообществах на аллелопатический режим древесных эдификаторов // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4 (46). С. 102–110. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-102-110.

22. *Гродзинский А.М., Головко Е.А., Горобец С.А*. Экспериментальная аллелопатия Киев: Наукова думка, 1975. 230 с.

23. *Souto C., Chiapusio G., Pellissier F.* Relationships between phenolics and soil microorganisms in spruce forests: significance for natural regeneration // Journal of Chemical Ecology. 2000. №. 26. P. 2025-2034. DOI: 10.1023/A:1005504029243.

DYNAMICS OF ALLELOPATIC SOIL EFFECTS IN FOREST ECO-SYSTEMS WITH A MONODOMINANT FOREST STAND AFTER SIMULATION OF RECREATIONAL LOAD

V.G. Scherbina

Branch of Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sochi, Kurortny Av., 99/18

The dynamics of allelopathic effects of the soil was assessed within seven months of the growing season after simulating a one-time recreational load in seven forest ecosystems of the humid subtropics of the Sochi Black Sea region. Using the index of allelopathic activity of the soil and the index of the relative allelopathic effect, the seasonal dynamics of stimulation and inhibition of the growth processes of the biotest was traced, depending on the presence of a certain tree species, the magnitude of a one-time recreational load and the time elapsed since anthropogenic impact. The rows of forest ecosystems were compiled in terms of the resistance of edaphic conditions to recreational impact and the resistance to the introduction of new species under the canopy of the forest stand in the range of recreational loads of 1.39–8.33 people/ha.

Keywords: Sochi Black Sea region, humid subtropics, forest ecosystems, monodominant forest stand, recreational load, soil, allelopathic effect, seasonal dynamics.

REFERENCES

1. *Grodzinskij A.M.* Allelopatija v zhizni rastenij i ih soobshhestv (Allelopathy in the life of plants and their communities), Kyiv: Naukova dumka, 1965, 198 p.

2. *Golovko E.A., Biljanovskaja T.M., and Vorobej I.I.* Allelopatija kul'turnih rastenij v aspekte problem agrofitocenologii (Allelopathy of Cultivated Plants in the Aspect of Problems of Agrophytocenology). *Fiziologija i biohimija kul'turnih rastenij*, 1999. Vol. 31, No. 2, pp. 103–113.

3. *Matveev N.M.* Allelopatija kak faktor jekologicheskoj sredy (Allelopathy as a factor of the ecological environment), Samara: Samar. kn. izd-vo, 1994, 206 p.

4. *Ivanov V.P.* Rastitel'nye vydelenija i ih znachenie v zhizni fitocenozov (Plant secretions and their importance in the life of phytocenoses), Moscow: Nauka, 1973, 294 p.

5. *Jurchak L.D.* Alelopatija v agrobiocenozah aromatichnih roslin (Alelopathy in agrobiocenoses of aromatic roslins), Kyiv: Fitosociocentr, 2005, 411 p.

6. *Hashoum H., Santonja M., Gauquelin T., Saatkamp A., Gavinet J., Greff S., Lecareux C., Fernandez C., and Bousquet-Mélou A.* Biotic interactions in a Mediterranean oak forest: role of allelopathy along phenological development of woody species. *European Journal of Forest Research,* 2017, Vol. 136, pp. 699–710. DOI: 10.1007/s10342-017-1066-z.

7. *Litvinskaya S.A.* and *Lozovoi S.P.* Pamjatniki prirody Krasnodarskogo kraja (Natural monuments of the Krasnodar Territory), Krasnodar: Periodika Kubani, 2005, 352 p.

8. *Shherbina V.G.* Allelopaticheskaja naprjazhennost' biotopov v lesnyh jekosistemah vlazhnyh subtropikov (Allelopathic intensity of biotopes in forest ecosystems of humid subtropics). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2021, No. 1 (43), pp. 95–106. Doi: 10.33075/2220-5861-2021-1-95-106.

9. Vremennaja metodika opredelenija rekreacionnyh nagruzok na prirodnye kompleksy pri organizacii turizma, jekskursij, massovogo povsednevnogo otdyha i vremennye normy jetih nagruzok (Temporary methodology for determining recreational loads on natural complexes in the organization of tourism, excursions, mass daily recreation and temporary norms of these loads), Moscow: CBNTIleshoza, 1987, 34 p.

10. *Ivonin V.M.* Rekreologija (Recreology), Rostov-on-Don: Izd-vo JuFU, 2008, 240 p.

11. *Ivonin V.M., Avdonin V.E., and Pen'kovskij N.D.* Rekreacionnaja jekologija gornyh lesov rossijskogo Prichernomor'ja (Recreational ecology of mountain forests of the Russian Black Sea region), Krasnodar: Izd-vo SKNC VSh, 2000, 271 p.

12. Kolichestvo osadkov i dozhdlivyh dnej. Klimat Sochi (The amount of precipitation and rainy days. Climate of Sochi), available at: https://pogoda33.ru/Sochi (March 03, 2021).

13. *Zakamskij S.V. and Zakamskij V.A.* Instrument dlja izvlechenija tonkih kornej derev'ev, rastenij (Tool for extracting thin roots of trees, plants). Patent, No. A01B1A01G23, 23.03.2013.

14. *Gavinet J., Santonja M., Baldy V., Hashoum H., Peano S., Tchong T., Gros R., Greff S., Fernandez C., and Bousquet-Mélou A.* Phenolics of the understory shrub Cotinus coggygria influence Mediterranean oak forests diversity and dynamics. *Forest Ecology and Management*, 2019, Vol. 441, pp. 262270 DOI: 10.1016/j.foreco.2019.03.049.

15. *Rokickij P.F.* Biologicheskaja statistika (Biological statistics), Minsk: Vysshaja shkola, 1964, 328 p.

16. *Fedotov G.N., Gorepekin I.V., and Pozdnjakova A.D*. Vzaimosvjaz' predystorii ispol'zovanija i himicheskih svojstv pochv s ih allelotoksichnost'ju (Relationship between the prehistory of use and the chemical properties of soils with their allelotoxicity), *Pochvovedenie,* 2020, No. 3, pp. 379–386. DOI:10.31857/S0032180X2003003X

17. *Grodzinskij A.M., Bogdan G.P., and Golovko Je.Ja.* Allelopaticheskoe pochvoutomlenie (Allelopathic soil fatigue), Kyiv: Naukova dumka, 1979, 248 p.

18. *Bulygin N.E.* Drevesnye rastenija mestnoj flory v urbanofitocenozah Sankt- Peterburga (Woody plants of local flora in urban phytocenoses of St. Petersburg). *GBS Bulletin*, 1995, Vol. 172, pp. 37.

19. *Golovko Je.A., Gorobec S.A., and Jahno V.S.* Rol' mikroorganizmov v substratoutomlenii (The role of microorganisms in substrate fatigue). *Rol' toksinov rastitel'nogo proishozhdenija v allelopatii*, Kiev: Naukova dumka, 1983, pp. 1029.

20. *Chajlahjan M.H.* Metabolity mikrobov kak stimuljatory rosta i razvitija vysshih rastenij (Metabolites of microbes as stimulators of growth and development of higher plants) // *Primenenie antibiotikov v rastenievodstve*. Erevan, 1962, pp. 113–121.

21. *Shherbina V.G.* Vlijanie rekreacionnogo vozdejstvija v lesnyh soobshhestvah na allelopaticheskij rezhim drevesnyh jedifikatorov (Influence of recreational impact in forest communities on the allelopathic regime of tree edificators). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2021, No. 4 (46), pp. 102–110. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-102-110.

22. *Grodzinskij A.M., Golovko E.A., and Gorobec S.A.* Jeksperimental'naja allelopatija (Experimental allelopathy). Kiev: Naukova dumka, 1975. 230 p.

23. *Souto C., Chiapusio G., and Pellissier F.* Relationships between phenolics and soil microorganisms in spruce forests: significance for natural regeneration. *Journal of Chemical Ecology*, 2000, Vol. 26, pp. 2025-2034. DOI: 10.1023/A:1005504029243.

УДК 378.1 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-105-111

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРОИЗВОДСТВЕ И В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

М.В. Лапа[1], С.Е. Кравцова[1], В.А. Сафонов[1,2,3]

[1]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет",
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
[2]Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
[3]Севастопольское отделение ГОИН, РФ, г. Севастополь, ул. Советская, 61
E-mail: siver_info@mail.ru, sekravtsova@sevsu.ru

В статье проведен обзор нормативной документации, регламентирующей проведение анализа состояния измерений, испытаний и контроля окружающей среды в организациях, выявлены недостатки. Показана актуальность работ по анализу метрологического обеспечения научных исследований. Приведены примеры усовершенствования метрологического обеспечения организаций по результатам исследования состояния измерений, испытаний и контроля в условиях центров стандартизации и метрологии, подразделений учета средств измерений предприятий.
Ключевые слова: анализ, измерения, испытания, контроль, окружающая среда, метрологическое обеспечение.

Поступила в редакцию: 03.02.2022. После доработки: 28.02.2022.

Введение. Стандарт ГОСТ Р ИСО 9000:2015 содержит требования, согласно которым организация должна осуществлять менеджмент знаний, мониторинг, измерение и оценку процессов, продукции и услуг [1]. ГОСТ Р ИСО 9004:2019 содержит положения, касающиеся окружающей среды: “внешними факторами, которые могут влиять на способность организации достигать устойчивого успеха, являются окружающая среда и производственная среда” согласно п.5.2.3.1 и п.9.5.3 [2]. Профессиональный стандарт (ПС) 40.012 «Специалист по метрологии» предусматривает выполнение трудовых функций (ТФ) С/03.6 «Анализ состояния метрологического обеспечения в подразделении» для 6 уровня квалификации и D/01.7 «Анализ состояния метрологического обеспечения в организации» для 7 уровня квалификации [3]. Анализ состояния метрологического обеспечения в подразделении включает: «анализ укомплектованности подразделения квалифицированными кадрами; анализ фонда нормативных документов по обеспечению единства измерений; анализ состояния средств измерений, поверочных схем; анализ информации об отказах средств измерений, контроля, испытаний в процессе эксплуатации, о состоянии и условиях их хранения, об эффективности использования» [3]. Анализ состояния измерений, контроля и испытаний проводится также при подготовке к сертификации систем менеджмента качества, разработка и сертификация которых необходима для аккредитации лабораторий, занимающихся мониторингом состояния окружающей среды, научными исследованиями. Формирование таких навыков важно также для будущих специалистов по метрологии, (направление 27.03.01, 27.04.01), которые будут выполнять такие работы.

Формулировка цели статьи и задач. Обзор и усовершенствование нормативной документации, регламентирующей вопросы анализа состояния измерений, испытаний и контроля окружающей среды на производстве, в научных исследованиях. Усовершенствование МО измерений, испытаний и контроля в

организациях по результатам исследования состояния измерений, испытаний и контроля в условиях предприятий г. Севастополя и Крыма.

Изложение основного материала. Проведем обзор нормативной документации (НД) для анализа состояния измерений, испытаний и контроля окружающей среды в организациях. Методика и порядок проведения работ изложены в [4], данные рекомендации действующие. Рекомендации [5,6] содержат общие принципы анализа и оценки метрологического обеспечения производства при внедрении стандартов ISO серии 9000, а также при аттестации производства. Однако перечень НД, которой следует руководствоваться при проведении анализа состояния измерений, контроля и испытаний в [4] содержит утратившие силу документы. Таким образом, необходимо усовершенствование нормативной базы, регламентирующей анализ состояния измерений, испытаний и контроля окружающей среды в организациях. В результате анализа перечня НД, рекомендованной в [4] выявлено, что следующие НД из перечня являются недействующими: ГОСТ 8.057-80, ГОСТ 8.207-76, ГОСТ 8.372-80, ГОСТ Р 1.11-99, ПР РСК 002-95, РД 50-660-88, РД 50-674-88, МИ 81-76, МИ 97-76, МИ 646-84, МИ 1460-86, МИ 2005-89, МИ 2089-90, МИ 2088-90, МИ 2125-90, МИ 2179-91, МИ 2187-92 ГСИ, МИ 2236-92 ГСИ, МИ 2265-93 ГСИ, МИ 2269-93, МИ 2277-93 ГСИ, МИ 2278-93 ГСИ, МИ 2281-94 ГСИ, МИ 2284-94 ГСИ, МИ 2334-95 ГСИ, МИ 2365-96 ГСИ, МИ 2386-96 ГСИ, Р РСК 001-95. Для 28 документа из рекомендованных в [4] выпущены обновленные актуальные версии, которые необходимо использовать при выполнении анализа состояния измерений и контроля окружающей среды в организациях. Укажем обновленные версии НД: ГОСТ Р 1.2-2020, ГОСТ Р 1.4-2004, ГОСТ Р 1.5-2012, ГОСТ 8.315-2019, ГОСТ 8.381-2009, ГОСТ 8.417-2002, ГОСТ 8.532-2002, ГОСТ Р 8.563-2009, ГОСТ Р 8.568-2017, ПР 50.2.007-2001, ПР 50.2.014-2002, ПР 50.2.014-2002, ПР 50.2.015-02, ПР 50.2.017-95, ПР 50.2.020, МИ 1317-2004, МИ 1730-87, МИ 2146-98, МИ 2232-2000, МИ 2233-2000, МИ 2266-2000, МИ 2267-2000, МИ 2301-2000, МИ 2301-2000, МИ 2314-2006, МИ 2322-99, МИ 2335-2003, МИ 2377-98, ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 (части 1-6), ГОСТ 8.566-2011, МИ 2230-92 ГСИ, 50.2.038-2004 ГСИ. Остальные НД, рекомендованные в [4], являются действующими. В результате проведенных исследований составлен перечень актуальной НД (34 документа), рекомендованный для проведения анализа состояния измерений, испытаний и контроля окружающей среды на предприятиях, в научных исследованиях.

В литературе, предлагаемой в электронных библиотечных системах, вопрос анализа МО измерений, испытаний и контроля окружающей среды освещен недостаточно, рассмотрен вопрос усовершенствования МО, методика выполнения анализа не рассматривается либо изложены краткие рекомендации согласно МИ 2240-98 [4].

В процессе выполнения анализа состояния измерений, испытаний и контроля окружающей среды (ОС) составляются: перечень средств измерений, обеспеченных поверкой (калибровкой) и ремонтом, сведений о применяемых методиках выполнения измерений (МВИ) и испытаний, ведомости параметров, не обеспеченных надлежащим контролем (измерениями), перечень СИ, не обеспеченных поверкой (калибровкой) и ремонтом, сведения о потребности организации в выпускаемых средствах измерений, сведения о претензиях к качеству, надежности и другим техническим характеристикам средств измерений, контроля окружающей среды и испытаний в организации и другие, примеры представлены в табл. 1-2.

Таблица 1. Сведения о претензиях к качеству, надежности и другим техническим характеристикам СИ, контроля ОС и испытаний (фрагмент)

№	Наименование СИ, тип, заводское обозначение	Кл. точности	Диапазон измерения	НД на СИ	Завод-изготовитель	Год выпуска	Количество СИ	Основные претензии к качеству изготовления и техническим характеристикам	Предложения по устранению недостатков и улучшению качества СИ
1	Измеритель нелинейных искажений С6-11	2 раз	20…199,9 кГц 0,3 мВ…100 В	ГОСТ 8.331-78 ДЛИ2. 770.00 3 ТО	Дочернее произв. предприятие "Меридиан-производство" Украина	1996	2	При ручном переключении диапазонов после снятия ручного режима выбранный диапазон не сохраняется	Усовершенствование конструкции прибора
2	Установка для поверки вольтметров В1-8	2 раз	$U=U=_{10}$ мкВ…300 В ПГ (0,2…0,003/U)% $U\sim U\sim_{10}$ мкВ…300 В (45,400,1000 Гц)	ЯЫ2. 761. 004 ТО	Завод "Пунане-Рэт", Эстония, г.Таллин	1984	2	Сильное влияние шумов при работе на малом напряжении	Дополнительная защита прибора от вибраций, внешних шумов
3	Генератор сигналов высокочастотный Г3-154	2 раз	Диапазон частот от 0,1 до 50 МГц пределы регулировки выходного напряжения от 0 до плюс 22 дБВ (от 1 до 12 В)	3.260. 015 ТО	"Нижегородский завод им. М.В. Фрунзе"	1987	2	Неудобное использование ручек установки и фиксации напряжения и частоты	Доработать конструкцию прибора, усовершенствовать внешний вид

Таблица 2. Сведения о потребности ПАО «Севастопольгаз» в эталонах для поверки средств измерений и контроля (фрагмент)

№	Наименование эталона	Тип, заводское обозначение	Завод-изготовитель	Наименование СИ для поверки (калибровки) кот. необходимы эталоны	Потребность предприятия в покупке/ аренде, шт.
1	Рабочий эталон единицы массы 2 разряда в диапазоне 1мг…1 кг	3.2.ВФФ.0001.2015	ООО «Сервис-ЮГ-ККМ»	Весы лабораторные	Покупка, 1 шт.
2	Эталон единицы объема 2 разряда в диапазоне значений 0,2… 200 м3	3.2.ВБХ.0003.2015	АО «ННК-Хабаровск-нефтепродукт»	Резервуары вертикальные и горизонтальные	Покупка, 1 шт.
3	Рабочий эталон единицы температуры 3 разряда в диапазоне значений минус 196…1200 ^{o}C	3.2.ГПЕ.0009.2018	АО «ВИКА МЕРА»	Термометры технические	Покупка, 3 шт.
4	ГЭЕ температуры 2 разряда в диапазоне значений от 30 до 600^{o}C	3.1.ZMA.0178.2013	ФБУ Ростест-Москва»	Пирометры	Аренда, 1 шт.
5	Государственный рабочий эталон единицы активности радионуклидов бета-излучения 2 разряда с номинальными значениями 33 и 102 Бк	3.1.ZTT.1697.2016	ФБУ «Ростест-Москва»	Спектрометры энергий ионизирующих излучений	Аренда, 1 шт.

Анализ состояния измерений, испытаний и контроля в научных исследованиях рассмотрим на примере подготовки к аккредитации лабораторий. Документация, материально-техническая оснащенность (СИ, испытательное оборудование) лабораторий должны соответствовать требованиям Критериев аккредитации, утвержденных Приказом Минэкономразвития России от 26.10.2020 г. №707 (далее – Критерии аккредитации) и ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 в заявленной области аккредитации. В соответствии с требованиями п. 3 ст. 13 Федерального закона "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 N 102-ФЗ с 24.09.2020г. результаты поверки средств измерений подтверждаются сведениями о результатах поверки средств измерений, включенными в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений (ФГИС АРШИН). Анализ сведений в научно-исследовательских лабораториях показал, что во ФГИС АРШИН не всегда имеются записи о результатах поверки СИ в лабораториях.

Анализ состояния испытательного оборудования показал, например, что в ХАЛ СО ГОИН, например, необходимо приобрести согласно РД 52.24.496-2018: термостатируемую баню (водяной термостат) ПЭ-4034, ЛБ-22-1 или аналогичную модель любого типа вместимостью не менее 2 дм3, обеспечивающая температуру (20±2)°С, (60±2)°С.

Имеющиеся приборы для измерения климатических параметров в научных

лабораториях иногда имеют предел допускаемой погрешности измерения больше, чем требуемые, например, «Метео-10», номер в ГРСИ 40355 имеет предел допускаемой абсолютной погрешности измерения атмосферного давления ±10гПа, или ±1кПа, а требуемый барометр БАММ-1 ±0,7кПа; РД 52.24.779-2013: имеющийся концентратомер КН-3 по разрешающей способности ±70 $см^{-1}$ не соответствует требуемой ±0,25 $см^{-1}$, необходимо приобрести новые приборы.

В условиях лабораторий ФГАОУ ВО «СевГУ» рассмотрим анализ состояния измерений, испытаний и контроля окружающей среды в научных исследованиях с использованием имеющегося в лабораториях кафедры «Техносферная безопасность и метрология» оборудования и документации к нему. Например, в ходе изучения курса «Метрологическое обеспечение производства» студенты направления 27.04.01 «Стандартизация и метрология изучают влияние состояния измерений, контроля и испытаний на эффективность мероприятий по охране окружающей среды в организациях. Рассматривается измерение факторов физического влияния на примере шума и вибрации с помощью аналогового прибора «ВШВ-003-М» (рис. 1а). Обучающиеся изучают МО измерений шума и вибраций, разрабатывают обоснование необходимости замены данного прибора на цифровой шумомер-виброметр «Экофизика-110А» (рис. 1б) для использования в научных исследованиях.



а) б)

Рис.1. Замена СИ для измерений факторов шума и вибрации
Fig. 1. Replacing the Noise and Vibration Meter

Эти работы также весьма актуальны, поскольку используемое в научных исследованиях оборудование иногда устаревшее, требует замены, не всегда обеспечено поверкой (калибровкой) и не удовлетворяет требованиям ФЗ-102 «Об обеспечении единства измерений», обособленная метрологическая служба в ВУЗах не всегда имеется. Метрологическое обеспечение научных исследований оказывает существенное влияние на их качество и результаты экспериментов, поскольку проведение научных экспериментов с использованием устаревшего оборудования, не обеспеченного поверкой и калибровкой, могут вводить в заблуждение.

В дальнейшем результаты анализа состояния измерений, испытаний и контроля применяются для усовершенствования метрологического обеспечения подразделений, предприятий, научных исследований. Так, например, на предприятии ФБУ «Крымский ЦСМ» магистрант Гайдученко С.И. исследовала процессы МО измерений в отделе поверки и калибровки механических СИ, используемых для испытаний (природная и дистиллированная вода, сточные воды, токсичные элементы и др.). Совместно с сотрудниками отдела разработала предложения по усовершенствованию МО испытаний и контроля в отделе: «для обеспечения весового контроля высокой точности отделу поверки и калибровки механических СИ приобрести компаратор массы МС-30К для поверки и калибровки гирь методом сличения эталонных и рабочих гирь, а также для измерений массы».

Выводы. Проведен обзор нормативной документации, регламентирующей выполнение анализа состояния измерений, испытаний и контроля окружающей среды на предприятиях, выявлены недостатки, разработан перечень актуальной НД, необходимой для выполнения данных работ. Анализ литературы выявил недостаточное освещение данного вопроса. Используемое в научных исследованиях оборудование иногда устаревшее, требует замены, не всегда обеспечено поверкой (калибровкой) и удовлетворяет требованиям Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» №102-ФЗ, поэтому актуальным является анализ состояния измерений, испытаний и контроля в научных исследованиях. Приведены примеры усовершенствования метрологического обеспечения измерений, испытаний и контроля в организациях по результатам исследования их состояния в условиях центров стандартизации и метрологии, подразделений учета средств измерений предприятий Крыма и г. Севастополя, научно-исследовательских лабораторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ Р ИСО 9000-2015.* Системы управления качеством. Основные положения и словарь. Введ. 2015-11-01. М.: Стандартинформ, 2018. 24 с.

2. *ГОСТ Р ИСО 9004:2019.* Системы управления качеством. Рекомендации по улучшению деятельности. Введ. 2020-10-01. М.: Стандартинформ, 2020. 28 с.

3. *Национальный* реестр профессиональных стандартов. 2021. URL: https://profstandart-rosmintrud.ru/reestr-profstandartov/ (дата обращения 18.01.2022).

4. *МИ 2240-98 ГСИ.* Анализ состояния измерений, контроля и испытаний на предприятии, в организации, объединении. Методика и порядок проведения работ. [Электронный ресурс] URL:https://files.stroyinf.ru/Data1/10/10940/index.htm (дата обращения 18.01.2022).

5. *МИ 2116-90* Рекомендация ГСИ. Анализ и оценка метрологического обеспечения при внедрении стандартов ISO серии 9000. [Электронный ресурс] URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293769/4293769079.pdf (дата обращения 18.01.2022).

6. *МИ 2117-90 ГСИ.* Организация метрологического обеспечения при внедрении стандартов ИСО серии 9000. [Электронный ресурс] URL: https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293769/4293769078.htm (дата обращения 18.01.2022)

ANALYSIS OF THE STATE OF MEASUREMENTS, TESTING AND ENVIRONMENT CONTROL IN PRODUCTION AND IN SCIENTIFIC RESEARCH

M.V. Lapa[1], S.E. Kravtsova[1], V.A.Safonov[1,2,3]

[1]Sevastopol State University,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33
[2]Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[3]Sevastopol branch of GOIN,
RF, Sevastopol, Sovetskaya St., 61

The article analyzes the normative documentation regulating the analysis of the state of measurements, testing and environment control in organizations. Shortcomings are identified. The relevance of works on the analysis of scientific research metrological support is shown. Examples of improving the metrological support of organizations based on the results of the study of the state of measurements, testing and control in the conditions of standardization and metrology centers, subdivisions of accounting for measuring instruments of enterprises are given.
Keywords: analysis; measurements; tests; control; metrological support; environment.

REFERENCES

1. GOST R ISO 9000-2015, Moscow: Standartinform, 2018, 24 p.
2. GOST R ISO 9004:2019, Moscow: Standartinform, 2020, 28 p.
3. https://profstandart-rosmintrud.ru/reestr-profstandartov (January 18, 2022).
4. MI 2240-98 GSI, available at: https://files.stroyinf.ru/Data1/10/10940/index.htm (January 18, 2022).
5. MI 2116-90, available at: https://meganorm.ru/Data2/1/4293769/4293769079.pdf (January 18, 2022).
6. MI 2117-90 GSI, available at: https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293769/4293769078.htm (January 18, 2022).

УДК 004.852 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-112-120

АНСАМБЛЕВЫЕ МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ ЭЙЛЕРА В ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

А.Н. Греков[1, 2], А.А. Кабанов[2]

[1]Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
[2]Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: i@angrekov.ru

Работа посвящена повышению достоверности навигационной информации автономных платформ, применяемых для изучения океанов и морей, а именно: определению углов Эйлера с использованием экспериментальных данных, формирующихся на выходе инерциальной навигационной системы, построенной на основе MEMS датчиков. Были рассмотрены два ансамблевых метода машинного обучения: мажоритарное голосование (голосование большинством) и взвешенное большинство голосов. Ансамбли были сформированы путём объединения трёх методов обучения с учителем: метода опорных векторов (support vector machine – SVM), k-ближайших соседей (k-nearest neighbors – KNN) и дерева принятия решений. Выполнена оптимизация гиперпараметров трёх этих классификаторов. В результате объединения оптимизированных классификаторов в ансамбль со взвешенным большинством голосов получен прирост правильности (accuracy) классификации по сравнению с индивидуальными алгоритмами: 0,92 на обучающем и тестовом наборах данных.

Ключевые слова: ансамблевые методы, дерево решений, k-ближайших соседей, машинное обучение, инерциальная навигационная система, автономные подводные аппараты

Поступила в редакцию: 22.12.2021. После доработки: 18.02.2022.

Введение. Многие страны мира проявляют огромный интерес к океану, который обладает богатыми ресурсами и энергией. В связи с этим ведутся активные исследования и разработка большого количества морского оборудования для изучения и освоения океана [1]. Наряду с классическими методами исследования океанов в последние десятилетия активно внедряются автономные платформы, такие как автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) [2], глайдеры [3] и автономные надводные миникорабли [4].

Для выполнения широкомасштабных съемок с приемлемой точностью таким платформам необходима достоверная навигационная информация, получаемая с помощью современных навигационных систем, к числу которых относятся инерциальные навигационные системы [5].

Развитие инерциальных навигационных систем связано со многими факторами: повышение точности, надежности, стабильности, компактности первичных датчиков и уменьшение их стоимости. Немаловажную роль в развитии играет совершенствование методов и разработка устойчивых алгоритмов обработки навигационной информации.

В настоящее время набирают всё большую популярность современные методы, улучшающие навигационные параметры с применением технологий машинного обучения [6]. В предлагаемой работе мы исследовали применение ансамблевых методов машинного обучения для определения углов Эйлера с использованием инерциальной навигационной системы на основе MEMS датчиков.

Материалы и методы. Целью ансамблевых методов является объединение прогнозов нескольких классификаторов, построенных с заданным алго-

ритмом обучения, для улучшения обобщаемости (надежности) по сравнению с оценкой индивидуального классификатора [7]. В данной работе мы применим два метода объединения: мажоритарное голосование (голосование большинством) [8] и взвешенное большинство голосов [9]. При голосовании большинством прогнозируемая метка класса для конкретной выборки является меткой класса, которая была спрогнозирована большинством классификаторов, предсказываемых каждым отдельным классификатором [10]. Термин большинство голосов относится только к конфигурациям с двоичными классами. Но, принцип мажоритарного голосования легко обобщить на многоклассовые конфигурации, в итоге получив, так называемое, голосование относительным большинством голосов. В таком случае мы выбираем метку класса, которая получила наибольшее число голосов. Такой классификатор полезен для набора одинаково хорошо работающих моделей, чтобы уравновесить их индивидуальные недостатки [11].

В отличие от мажоритарного голосования взвешенное большинство голосов возвращает метку класса как аргумент максимизации суммы предсказанных вероятностей. Каждому классификатору присваивается определенные веса с помощью параметра весов. Когда веса получены, прогнозируемые вероятности классов для каждого классификатора собираются, умножаются на вес классификатора и усредняются. Окончательная метка класса затем получается из метки класса с наивысшей средней вероятностью.

В математической форме можно записать взвешенное большинство голосов следующим образом:

$$\hat{y} = \arg\max \sum_{j=1}^{m} w_j \chi_A(C_j(x) = i), \quad (1)$$

где w_j – вес, ассоциированный с базовым классификатором C_j; $\hat{y}$ – метка класса, спрогнозированная ансамблем; χ_A – характеристическая или индикаторная функция, которая возвращает 1, если спрогнозированный класс j-го классификатора соответствует $i(C_j(x) = i)$. Для равных весов уравнение можно упростить, записав его так:

$$\hat{y} = \text{мода}\{C_1(x), C_2(x), \ldots, C_m(x)\}. \quad (2)$$

Для реализации этих двух методов объединения классификаторов воспользуемся модулем ensemble библиотеки scikit-learn [12] с параметром voting класса VotingClassifier «soft» для взвешенного большинства голосов и «hard» для мажоритарного голосования.

В качестве входных данных для классификаторов используется информация, получаемая с MEMS датчиков разработанной навигационной платформы. Состав платформы и метод получения данных подробно рассмотрены в работах [13, 14].

Методы взвешенного большинства голосов и мажоритарного голосования требуют минимум два классификатора. В работе мы реализовали три наиболее распространенных метода обучения с учителем: метод опорных векторов (support vector machine – SVM), k-ближайших соседей (k-nearest neighbors – KNN) и дерево принятия решений.

Метод опорных векторов подробно исследован в работе [13]. Там же по кривым проверки были получены оптимальные значения гиперпараметров для SVM классификатора (ядро linear и обратный параметр регуляризации C = 10).

Оптимизацию гиперпараметров остальных моделей машинного обучения для подготовленного набора данных проведем методом поиска по сетке [15], реализованным в модуле model_selection библиотеки scikit-learn [12], с перекрестной проверкой по 10 блокам [16, 17]. В качестве метрики эффективности моделей применим долю правильных ответов алгоритма (accuracy). В русскоязычной литературе нет устоявшегося перевода

термина «accuracy» в контексте машинного обучения. Воспользуемся одним из популярных вариантов «Правильность» [18].

KNN. Алгоритм KNN для классификации каждой новой точки осуществляет поиск k ближайших соседних точек в обучающем наборе. Новая точка получает ту метку, которой помечено большинство соседей [19–21]. В качестве меры удаленности новой точки от ближайших соседей в KNN может использоваться евклидово расстояние:

$$d_{\text{эвклидово}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \qquad (3)$$

и манхэттенское расстояние:

$$d_{\text{манхэттенское}} = \sum_{i=1}^{n}|x_i - y_i|. \qquad (4)$$

По умолчанию класс NearestNeighbors использует расстояние Минковского:

$$d_{\text{Минковского}} = \left(\sum_{i=1}^{n}|x_i - y_i|^p\right)^{1/p}, \qquad (5)$$

где x_i и y_i – два наблюдения, между которыми мы вычисляем расстояние. Расстояние Минковского включает гиперпараметр p, где p = 1 – это манхэттенское расстояние, p = 2 – евклидово расстояние и т.д. В библиотеке scikit-learn по умолчанию p = 2.

Дерево принятия решений. Дерево принятия решений является непараметрическим методом обучения с учителем, позволяющим разбить набор данных на ветви с последующим принятием простых решений на каждом уровне [22, 23]. Окончательное решение получают, спускаясь по ветвям этого дерева. Обучение дерева принятия решений – систематический метод построения прогностической модели при классификации, основанный на данных. В работе Лео Бреймана с коллегами [24] заложены теоретические основания деревьев принятия решений, используемые и по сей день.

Результаты. Перед реализацией классификаторов проведено разделение набора данных на обучающий и испытательный наборы, а также стандартизация признаков аналогично [13]. Применим метод поиска по сетке для оптимизации гиперпараметров классификатора KNN. Для этого необходимо задать перечень и диапазоны гиперпараметров (напомним, что в качестве метрики эффективности выступает доля правильных ответов). Как отмечалось выше, KNN может определять расстояние от ближайших соседей через евклидово, манхэттенское расстояния и расстояние Минковского (табл. 1). Кроме того, огромное значение имеет количество точек k, до которых мы определяем расстояние. Как правило, более высокие значения k уменьшают влияние шума на классификацию [25], но делают границы между классами менее четкими. Также для прогноза может использоваться разная весовая функция: однородные веса (все точки в каждой области имеют одинаковый вес) и вес точек, обратный расстоянию до них (ближайшие соседние точки к искомой будут иметь большее влияние, чем точки, находящиеся дальше).

Таблица 1. Перечень и диапазон основных гиперпараметров классификатора KNN

Гиперпараметр	Диапазон
Метрика расстояния	Манхэттенское, евклидово и Минковского (p = 3)
Количество соседей	5, 10, 20, 50, 100
Весовая функция	Однородная и зависящая от расстояния

В результате поиска по сетке были получены низкие значения правильности (accuracy) классификации 0,52 (рис. 1) при оптимальных значениях гиперпараметров, представленных в табл. 2. При дальнейшем увеличении количества соседей правильность (accuracy) классификации убывает. Низкое значение правильности (accuracy) классификации говорит о том, что необходима дополнительная обработка данных перед классификацией (например, понижение размерности), но это требует дополнительных исследований и выходит за рамки данной работы.

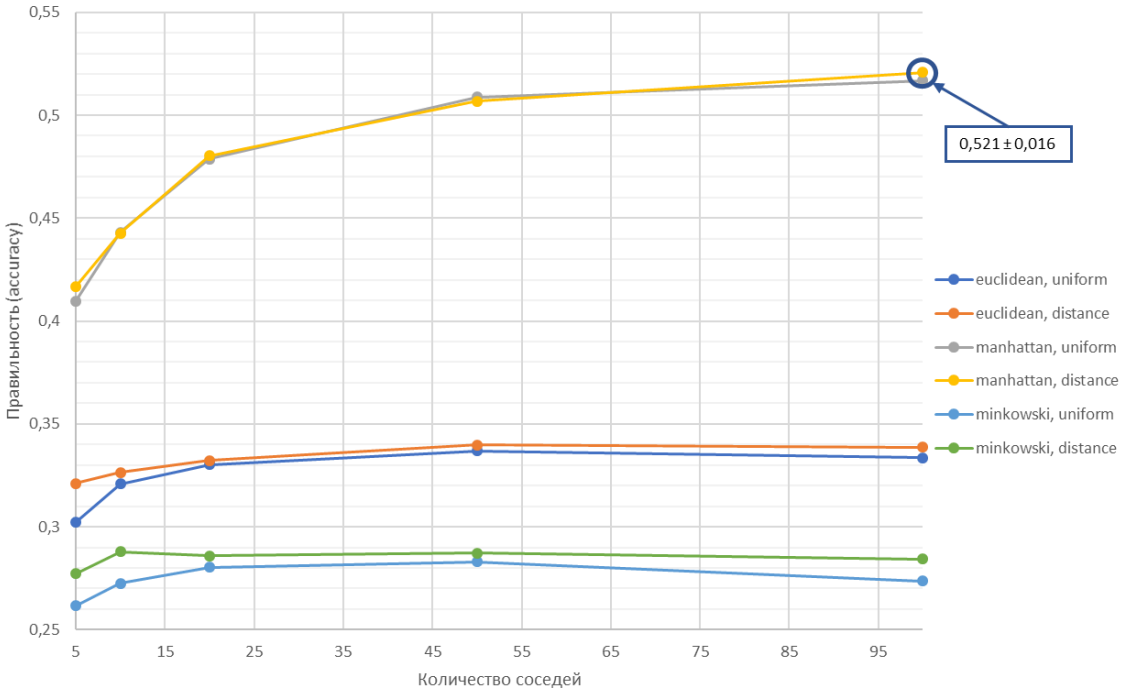


Рис. 1. Зависимость правильности классификации (accuracy) алгоритма KNN с нормализацией признаков от количества соседей при различных метриках расстояния и весовых функциях

Fig. 1. Classification accuracy dependency of the KNN algorithm with feature normalization on the number of neighbors for different distance metrics and weight functions

Таблица 2. Оптимальные значения гиперпараметров алгоритма KNN с нормализацией признаков

Гиперпараметр	Диапазон
Метрика расстояния	Манхэттенское
Количество соседей	100
Весовая функция	Зависящая от расстояния

В нашем случае хорошие результаты классификации были получены на данных без предварительной стандартизации: правильность (accuracy) классификации 0,889 (рис. 2) при значениях гиперпараметров, представленных в табл. 3.

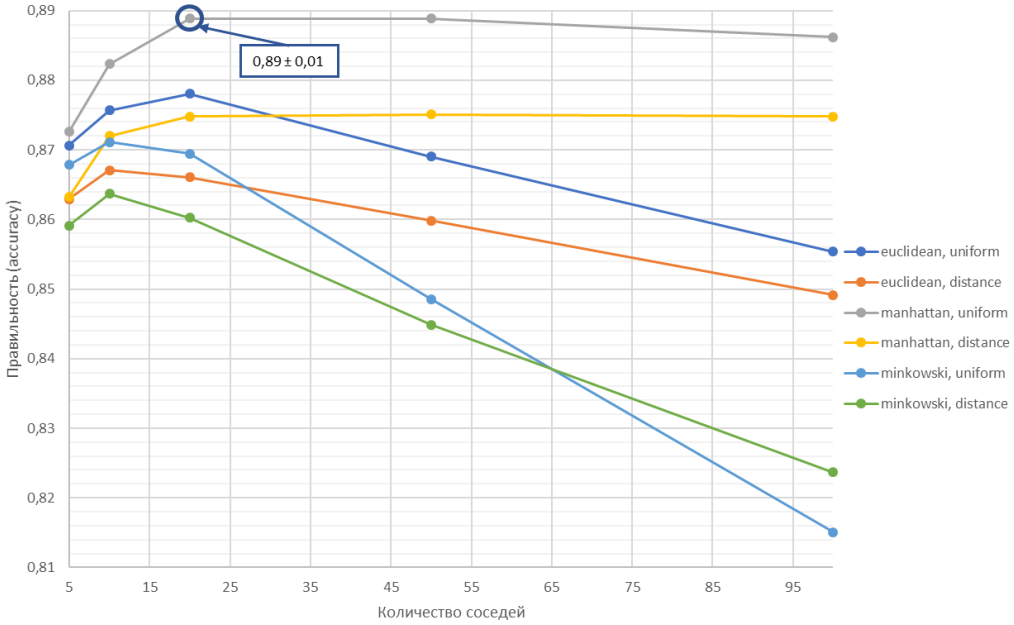


Рис. 2. Зависимость правильности классификации (accuracy) алгоритма KNN без нормализации признаков от количества соседей при различных метриках расстояния и весовых функциях

Fig. 2. Classification accuracy dependency of the KNN algorithm without feature normalization on the number of neighbors for different distance metrics and weight functions

Таблица 3. Оптимальные значения гиперпараметров алгоритма KNN без нормализации признаков

Гиперпараметр	Диапазон
Метрика расстояния	Манхэттенское
Количество соседей	20
Весовая функция	Однородная

Для реализации поиска по сетке для дерева решений воспользуемся перечнем и диапазоном гиперпараметров (табл. 4).

Таблица 4. Перечень и диапазон гиперпараметров дерева решений

Гиперпараметр	Диапазон
Критерий разбиения	Джини и энтропия
Максимальная глубина дерева	1 – 15
Минимальное количество выборок для конечного узла (msl)	1 – 4

Правильность (accuracy) классификации, полученная при оптимальных значениях гиперпараметров (табл. 5), составляет 0,91 ± 0,01 (рис. 3). Полученные результаты показывают, что эффективность прогнозирования индивидуальных классификаторов почти равна.

Таблица 5. Оптимальные значения гиперпараметров для дерева решений

Гиперпараметр	Диапазон
Критерий разбиения	Энтропия
Максимальная глубина дерева	6
Минимальное количество выборок для конечного узла (msl)	1

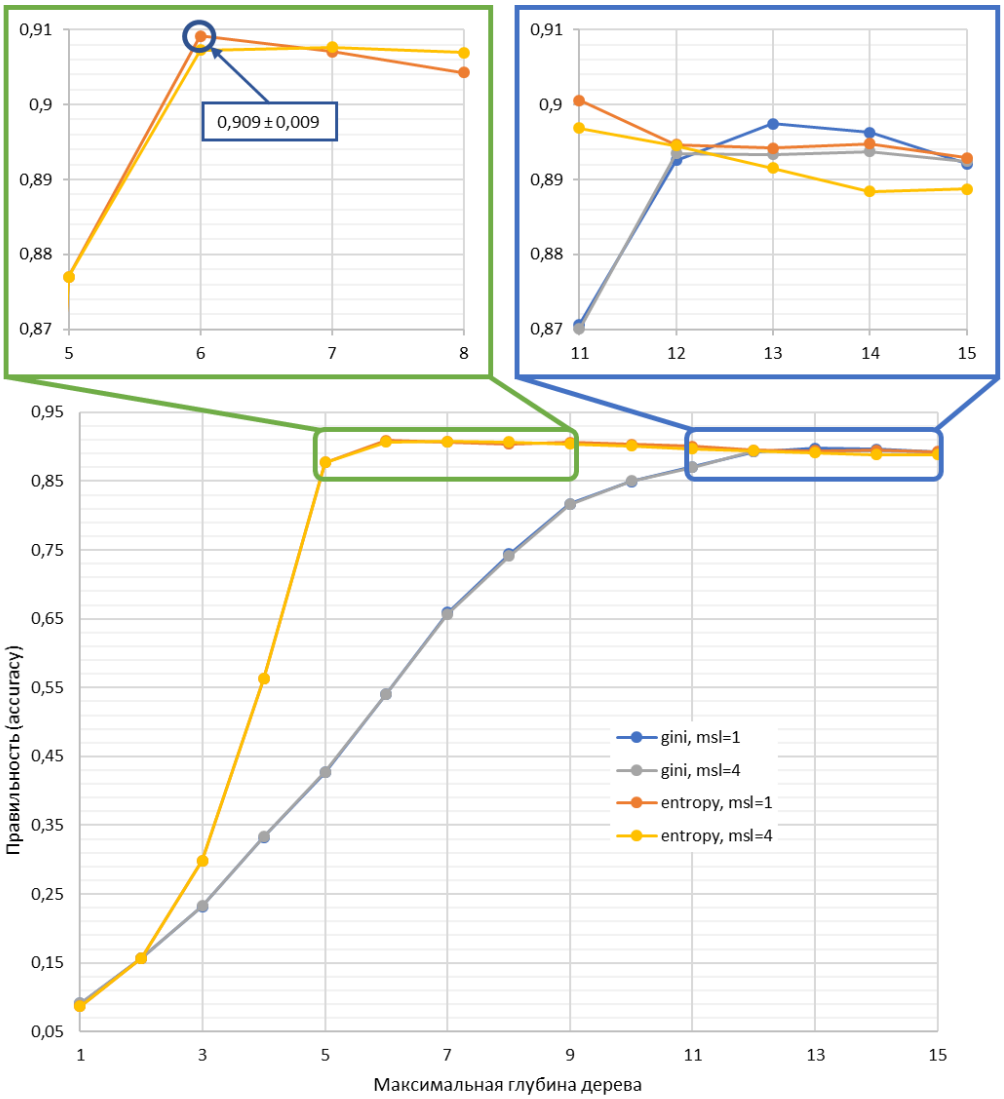


Рис. 3. Зависимость правильности классификации (accuracy) дерева решений от максимальной глубины дерева при различных значениях минимального количества выборок для конечного узла (msl)

Fig. 3. Classification accuracy dependency of the decision tree on the maximum depth of the tree for various minimum number of samples in a leaf (msl)

Теперь объединим три наших классификатора с оптимальными гиперпараметрами. В качестве метрики эффективности нашего ансамбля также воспользуемся правильностью (accuracy) классификации, а валидацию проведем с помощью перекрестной проверки по 10 блокам. Для взвешенного большинства голосов правильность (accuracy) классификации обучающего набора составила 0,92 ± 0,01. При этом правильность (accuracy) классификации на тестовом наборе показала следующие результаты:

- SVM 0,91,
- KNN 0,90,
- Дерево решений 0,91,
- Ансамбль 0,92.

Для мажоритарного голосования правильность (accuracy) классификации обучающего набора составила 0,91 ± 0,01, а правильность (accuracy) классификации на тестовом наборе показала следующие результаты:

- SVM 0,91,
- KNN 0,90,
- Дерево решений 0,91,
- Ансамбль 0,91.

Выводы. Используя данные, полученные с MEMS датчиков разработанной навигационной платформы, были опробованы две модели классификатора: KNN и дерево решений. После оптимизации гиперпараметров правильность (accuracy) классификации модели KNN составила 0,89 ± 0,01, а модели дерево решений – 0,91 ± 0,01. Проверка на тестовом наборе данных также подтвердила хорошую эффективность этих классификаторов: правильность (accuracy) KNN – 0,90, а дерева решений – 0,91. Объединение двух вышеупомянутых классификаторов и классификатора SVM в ансамбль со взвешенным большинством голосов дает небольшой прирост правильности (accuracy) классификации: 0,92 на обучающем и тестовом наборах данных, что позволяет рекомендовать полученные результаты исследований для улучшения качества навигационной информации. В случае ансамбля с мажоритарным голосованием значимого прироста правильности (accuracy) классификации не выявлено по сравнению с индивидуальными классификаторами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение Минобрнауки РФ № 075-03-2021-092/5 от 29.09.2021, FEFM-2021-0014 № 121111600136-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н.* Среднечастотные акустические методы и средства для исследования водной среды. Севастополь: ИПТС, 2020. 126 с. ISBN 978-5-6044196-6-3

2. *Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В.* Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 1. С. 6–17.

3. *Гайкович Б.А., Занин В.Ю., Кожемякин И.В.* Вопросы разработки морских робототехнических платформ на примере создания подводного аппарата типа «Глайдер» // Морская робототехника. Перспективные системы и задачи управления: труды конференции. 2016. С. 151.

4. *Шишкин Ю.Е., Греков А.Н.* Концепция интеллектуальной системы автоматизированного экологического мониторинга на базе малогабаритных автономных роботов // Системы контроля окружающей среды. 2018. № 4(34). С. 63–69.

5. *Греков А.Н., Греков Н.А., Алексеев С.Ю.* Бесплатформенный навигационный комплекс с инерциальной системой ориентации на «грубых» чувствительных элементах и способ коррекции его инерциальных датчиков; Пат. 2548115 Россия, МПК G01C 23/00. № 2014151906/93; заявл. 18.12.14; опубл. 10.04.15; Бюл. № 10.

6. *Li Y. et al.* Inertial Sensing Meets Machine Learning: Opportunity or Challenge? // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021.

7. *Raschka S., Mirjalili V.* Python Machine Learning: Machine Learning and Deep Learning with Python. Scikit-Learn, and TensorFlow. Second edition ed. 2017.

8. *Ruta D., Gabrys B.* Classifier selection for majority voting // Information fusion. 2005. Vol. 6. № 1. P. 63–81.

9. *Kuncheva L.I.* Combining pattern classifiers: methods and algorithms. John Wiley & Sons, 2014.

10. *Alpaydin E.* Introduction to machine learning. MIT press, 2020.

11. *Dietterich T.G.* Ensemble Methods in Machine Learning. In International Workshop on Multiple Classifier Systems; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2000. P. 1–15.

12. *Pedregosa F. et al.* Scikit-learn: Machine Learning in Python // Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.

13. *Греков А.Н., Кабанов А.А., Алексеев С.Ю.* Метод опорных векторов для определения углов Эйлера в инерциальной навигационной системе // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4 (46). С. 134–142. DOI:10.33075/2220-5861-2021-4-134-142

14. *Греков А.Н., Алексеев С.Ю., Башкиров В.Ю.* Результаты лабораторных испытаний подводной навигационной

системы для аппаратов экологического контроля // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3 (41). С. 65–74. DOI:10.33075/2220-5861-2020-3-65-74

15. *Molin S., Jee K.* Hands-On Data Analysis with Pandas - Second Edition: A Python Data Science Handbook for Data Collection, Wrangling, Analysis, and Visualization. Packt Publishing, 2021. 788 p. ISBN 9781800563452.

16. *Kohavi R. et al.* A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection // Ijcai. 1995. Vol. 14. № 2. P. 1137–1145.

17. *Varma S., Simon R.* Bias in error estimation when using cross-validation for model selection // BMC bioinformatics. 2006. Vol. 7. № 1. P. 1–8.

18. *Рашка С., Мирджалили В.* Python и машинное обучение: машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn и TensorFlow 2. СПб.: ООО «Диалектика», 2020. 848 с.

19. *Peterson L.E.* K-nearest neighbor // Scholarpedia. 2009. Vol. 4. № 2. P. 1883.

20. *Zhang S. et al.* Efficient kNN classification with different numbers of nearest neighbors // IEEE transactions on neural networks and learning systems. 2017. Vol. 29. № 5. P. 1774–1785.

21. *Guo G. et al.* KNN model-based approach in classification // OTM Confederated International Conferences "On the Move to Meaningful Internet Systems". Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. P. 986–996.

22. *Джоши П.* Искусственный интеллект с примерами на Python. М.; СПб.: Диалектика. 2019.

23. *Quinlan J.R.* Induction of decision trees // Machine learning. 1986. Vol. 1. № 1. P. 81–106.

24. *Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., Stone C.J.* Classification and regression trees. Wadsworth Inc. 1984. Vol. 67. 368 p.

25. *Everitt B.S., Landau S., Leese M., Stahl D.* Miscellaneous Clustering Methods // Cluster Analysis: 5th Edition, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK. 2011. 352 p.

ENSEMBLE MACHINE LEARNING METHODS FOR EULER ANGLES DETECTION IN AN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

A.N. Grekov[1, 2], A.A. Kabanov[2]

[1]Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[2]Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33
E-mail: i@angrekov.ru

The work is focused on increasing the reliability of navigation information of autonomous platforms used in studying oceans and seas, namely: determining the Euler angles using experimental data generated at the output of an inertial navigation system built on the basis of MEMS sensors. Two ensemble methods of machine learning are considered: majority voting (voting by the majority) and weighted majority voting. The ensembles are formed by combining three supervised learning methods: support vector machine (SVM), k-nearest neighbors (KNN), and decision trees. Optimization of hyperparameters of these three classifiers is performed. As a result of combining the optimized classifiers into an ensemble with a weighted majority, an increase in classification accuracy (accuracy) is obtained compared to individual algorithms: 0.92 on the training and test data sets.

Keywords: ensemble methods, decision tree, k-nearest neighbors, machine learning, inertial navigation system, autonomous underwater vehicles

REFERENCES

1. *Grekov A.N., Grekov N.A., and Sychov E.N.* Srednechastotnye akusticheskie metody i sredstva dlya issledovaniya vodnoj sredy (Mid-frequency acoustic methods and instruments for the study of the aquatic environment). Sevastopol': IPTS, 2020, 126 p. ISBN 978-5-6044196-6-3

2. *Kiselev L.V., Inzarcev A.V., and Matvienko Yu.V.* Sozdanie intellektual'nyh ANPA i problemy integracii nauchnyh issledovanij (Creation of intelligent AUVs and problems of scientific research integra-

tion). *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2006, No. 1. pp. 6–17.

3. *Gajkovich B.A., Zanin V.YU., and Kozhemyakin I.V.* Voprosy razrabotki morskih robototekhnicheskih platform na primere sozdaniya podvodnogo apparata tipa "Glajder" (Issues of development of marine robotic platforms on the example of the creation of an underwater vehicle of the "Glider" type). *Morskaya robototekhnika. Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: trudy konferencii*, 2016, pp. 151.

4. *Shishkin Y.E. and Grekov A.N.* Koncepcija intellektual'noj sistemy avtomatizirovannogo jekologicheskogo monitoringa na baze malogabaritnyh avtonomnyh robotov (The concept of automated environmental monitoring intellectual system based on compact autonomous robots). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2018, No. 4(34), pp. 63–69.

5. *Grekov A.N., Grekov N.A., and Alekseev S.Yu.* Besplatformennyj navigacionnyj kompleks s inercial'noj sistemoj orientacii na ”grubyh” chuvstvitel'nyh elementah i sposob korrekcii ego inercial'nyh datchikov (Strapdown navigation system with an inertial orientation system on "coarse" sensitive elements and a method for correcting its inertial sensors); Pat. 2548115 Rossiya, MPK G01S 23/00. № 2014151906/93; zayavl. 18.12.14; opubl. 10.04.15, Byul. № 10.

6. *Li Y. et al.* Inertial Sensing Meets Machine Learning: Opportunity or Challenge? *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021.

7. *Raschka S. and Mirjalili V.* Python Machine Learning: Machine Learning and Deep Learning with Python. Scikit-Learn, and TensorFlow, 2017.

8. *Ruta D. and Gabrys B.* Classifier selection for majority voting. *Information fusion*, 2005, Vol. 6, No. 1, pp. 63–81.

9. *Kuncheva L.I.* Combining pattern classifiers: methods and algorithms. John Wiley & Sons, 2014.

10. *Alpaydin E.* Introduction to machine learning. MIT press, 2020.

11. *Dietterich T.G.* Ensemble Methods in Machine Learning. In International Workshop on Multiple Classifier Systems; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2000, pp. 1–15.

12. *Pedregosa F. et al.* Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, Vol. 12, pp. 2825–2830.

13. *Grekov A.N., Kabanov A.A., and Alekseev S.Yu.* Metod opornyh vektorov dlya opredeleniya uglov Ejlera v inercial'noj navigacionnoj sisteme (Support vector machine for determining Euler angles in an inertial navigation system). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2021, No. 4 (46), pp. 134–142. DOI:10.33075/2220-5861-2021-4-134-142

14. *Grekov A.N., Alekseev S.Yu., and Bashkirov V.Yu.* Rezul'taty laboratornyh ispytanij podvodnoj navigacionnoj sistemy dlya apparatov ekologicheskogo kontrolya (The results of laboratory tests underwater navigation system for environmental monitoring devices). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2020, No. 3 (41), pp. 65–74. DOI:10.33075/2220-5861-2020-3-65-74

15. *Molin S. and Jee K.* Hands-On Data Analysis with Pandas - Second Edition: A Python Data Science Handbook for Data Collection, Wrangling, Analysis, and Visualization. Packt Publishing, 2021, 788 p. ISBN 9781800563452.

16. *Kohavi R. et al.* A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. *Ijcai*, 1995, Vol. 14, No. 2, pp. 1137–1145.

17. *Varma S. and Simon R.* Bias in error estimation when using cross-validation for model selection. *BMC bioinformatics*, 2006, Vol. 7, No. 1, pp. 1–8.

18. *Rashka S. and Mirdzhalili V.* Python i mashinnoe obuchenie: mashinnoe i glubokoe obuchenie s ispol'zovaniem Python, scikit-learn i TensorFlow 2 (Python and machine learning: machine and deep learning using Python, scikit-learn and TensorFlow 2), Saint-Petersburg: OOO “Dialektika”, 2020, 848 p.

19. *Peterson L.E.* K-nearest neighbor. *Scholarpedia*, 2009, Vol. 4, No. 2, p. 1883.

20. *Zhang S. et al.* Efficient kNN classification with different numbers of nearest neighbors. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 2017, Vol. 29, No. 5, pp. 1774–1785.

21. *Guo G. et al.* KNN model-based approach in classification. *OTM Confederated International Conferences "On the Move to Meaningful Internet Systems"*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2003, pp. 986–996.

22. *Dzhoshi P.* Iskusstvennyj intellekt s primerami na Python (Artificial Intelligence with Python Examples). Moscow; Saint-Petersburg: Dialektika, 2019.

23. *Quinlan J.R.* Induction of decision trees. *Machine learning*, 1986, Vol. 1, No. 1, pp. 81–106.

24. *Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., and Stone C.J.* Classification and regression trees. Wadsworth Inc. 1984, Vol. 67, 368 p.

25. *Everitt B.S., Landau S., Leese M., and Stahl D.* Miscellaneous Clustering Methods. *Cluster Analysis*: John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, 2011, 352 p.

УДК 621.396.96 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-1-121-130

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ ШУМОВЫХ ПОМЕХ В РАДИОЛОКАТОРЕ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ГИДРОМЕТЕОРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В АТМОСФЕРЕ

Ю.М. Поповнин, Д.М. Пузанов, В.Ф. Гришко

Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова,
г. Севастополь, ул. Дыбенко, 1а
E-mail: yuri-sevastopol@yandex.ru

Создана имитационная модель адаптивной комбинированной пространственно-поляризационной системы обнаружения гидрометеорных образований в атмосфере. В основу создания данной модели положено статистическое моделирование как электромагнитного поля, создаваемого полезным сигналом и помеховыми колебаниями так и настраиваемых параметров исследуемой системы. Законы распределения входных случайных процессов описывались гауссовой статистикой. Адаптация весовых коэффициентов к помеховой обстановке осуществлялась с использованием градиентного алгоритма. Построены зависимости относительной дисперсии процесса на выходе исследуемой системы от номера шага адаптации, которые свидетельствуют о высокой эффективности обнаружения отражённого сигнала от гидрометеоров в условиях воздействия шумовых помех, произвольно ориентированных в пространстве.

Ключевые слова: гидрометеоры, весовые вектора систем пространственной обработки, нестационарный случайный процесс, оценка дисперсии выходной выборки.

Поступила в редакцию: 24.02.2022. После доработки: 10.03.2022.

Введение. Работа метеорологического радиолокатора (МРЛ) по обнаружению гидрометеоров в атмосфере может происходить в довольно сложной помеховой обстановке, обусловленной воздействием помеховых колебаний как по главному, так и по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА).

Формирование шумовых помех может быть вызвано наличием в воздушном пространстве большого числа летательных аппаратов военного и гражданского назначения, являющихся как источниками излучения собственных радиоэлектронных систем (РЭС), так и объектами переотражения мощных наземных, космических или корабельных РЭС. Кроме того, в тропосфере всегда присутствуют неустойчивые воздушные объекты, так называемые неоднородности, плотность, форма и размер которых непрерывно флюктуируют. Электромагнитные волны, падающие на эти неоднородности, наводят в них токи, порождающие вторичное излучение, то есть они выполняют функцию естественных природных ретрансляторов [1, 2].

В совокупности, указанные факторы могут привести к ситуации, когда с определённых пространственных направлений действует множество взаимно независимых помеховых колебаний, что в соответствии с центральной предельной теоремой даёт основание считать, что закон распределения суммарного помехового колебания описывается гауссовой кривой.

Для расширения общности проводимого исследования будем полагать, что спектр каждого суммарного помехового колебания, поступающего с определённого направления, является равномерным в пределах полосы пропускания приёмника МРЛ, а его ширина значительно превышает ширину спектра зондирующего сигнала. Указанное обстоятельство в совокупности с гауссовской плотностью вероятности даёт основание считать модель суммарного помехового колебания, действующего с определённого направления белым гауссовским шумом.

Вполне вероятно, что подобные независимые суммарные источники шумовых помех могут быть сформированы на нескольких, произвольно ориентированных в пространстве направлениях относительно точки приёма, что приводит к воздействию помеховых колебаний как по основному, так и по боковым лепесткам ДНА МРЛ.

Указанное обстоятельство обуславливает существенное падение эффективности как пространственно-временных, так и поляризационно-временных адаптивных алгоритмов, используемых для обработки сигналов в существующих РТС [3–8]. Одним из перспективных способов подавления шумовой помехи с произвольной структурой пространственного спектра мощности является комплексирование адаптивных методов пространственно- и поляризационно-разнесенного приёма [3, 4, 6–8].

Существует несколько работ, в которых предлагается использовать комбинированную пространственно-поляризационную обработку сигналов.

Так, в [3, 4, 6, 7] синтезированы алгоритмы, в которых предусматривается построение пространственно-поляризационного адаптивного процессора на основе комплексного взвешивания входных напряжений и последующего их суммирования. Но, основное внимание в этих работах уделено созданию аналитической модели функционирования рассматриваемых систем. В публикациях [4, 7] освещаются вопросы синтеза пространственно-поляризационных структур, в которых предусматривается осуществление оптимальной факторизации обработки сигналов, путём введения предварительного матричного преобразования. Однако описание процессов функционирования предлагаемых систем ограничивается применением математических выражений, в которых обязательные операции по усреднению действующих случайных процессов выполняются строго аналитическим образом.

Целью предлагаемой статьи является создание имитационной статистической модели функционирования адаптивного пространственно-поляризационного фильтра с факторизованной обработкой сигналов и на основании полученной модели проанализировать эффективность селекции отражённого сигнала от гидрометеоров в условиях воздействия шумовых помех с произвольной структурой пространственного спектра мощности. Предполагается, что факторизация обработки осуществляется путём введения предварительного невырожденного матричного преобразования $\mathbf{Q}$.

Основная часть. Аналитически, представить последовательную процедуру факторизованной пространственно-поляризационной обработки сигналов можно в виде следующего векторно-матричного соотношения:

$$\dot{U}_{\Sigma} = \mathbf{K}_{v}^{\text{н}}\mathbf{Q}_{v}\mathbf{U}_{v} + \dot{K}_{\text{пол}}\mathbf{K}_{h}^{\text{н}}\mathbf{Q}_{h}\mathbf{U}_{h}. \qquad (1)$$

Здесь $\mathbf{K}_{v}$ и $\mathbf{K}_{h}$ являются m-мерными весовыми векторами системы пространственной обработки (СПрО), соответственно: $\mathbf{K}_{v}$ – в подсистеме с вертикальным (v) расположением приёмных элементов, $\mathbf{K}_{h}$ – в подсистеме с горизонтальным (h) расположением приёмных элементов; $\dot{K}_{\text{пол}}$ – комплексный весовой коэффициент системы поляризационной обработки (СПлО); $\mathbf{Q}_{v}$ и $\mathbf{Q}_{h}$ – матричные фильтры, расположенные в подсистемах с ортогональной (v и h) ориентацией антенн, размерности ($m \times m$); $\mathbf{U}_{v}$ и $\mathbf{U}_{h}$ – m-мерные векторы принимаемых колебаний, соответственно представляющие собой аддитивную смесь векторов полезного сигнала $\mathbf{U}_{cv}$ и $\mathbf{U}_{ch}$, помеховых колебаний $\mathbf{U}_{\text{п}v}$ и $\mathbf{U}_{\text{п}h}$ и внутреннего шума $\mathbf{U}_{\text{ш}v}$ и $\mathbf{U}_{\text{ш}h}$, m – число приёмных каналов в каждой из подсистем (v и h) пространственной обработки; “н” – знак эрмитовой сопряженности (транспонирования и комплексной сопряжённости).

При получении выражения (1) полагалось, что эффекты деполяризации полезного сигнала отсутствуют, а соответствующие поляризационные коэффициенты приёма равны: $K_{gv} = 1$ и $K_{gh} = 0$.

Будем полагать, что в адаптивной пространственно-поляризационной системе выделены основные каналы приёма (по одному в каждой из пространственных подсистем v и h), тогда выражение (1) приводится к виду:

$$\dot{U}_{\Sigma} = \left(\dot{U}_{0v} + \mathbf{W}_v^{\text{н}}\widetilde{\mathbf{Q}}_v\mathbf{U}_v\right) + \\ + \dot{K}_{\text{пол}}\left(\dot{U}_{0h} + \mathbf{W}_h^{\text{н}}\widetilde{\mathbf{Q}}_h\mathbf{U}_h\right), \quad (2)$$

где $\dot{U}_{0v}$ и $\dot{U}_{0h}$ – представляют собой комплексные амплитуды напряжений в выделенных основных каналах приёма:

$$\dot{U}_{0v} = \dot{U}_{\text{с}}F(\theta_{\text{с}}) + \\ + \sum_{i=1}^{N}\dot{U}_{\text{п}i}F(\theta_{\text{п}i})\sin\gamma_{\text{п}i}e^{j\varphi_{\text{п}vi}} + \dot{U}_{\text{ш}},$$

$$\dot{U}_{0h} = \sum_{i=1}^{N}\dot{U}_{\text{п}i}F(\theta_{\text{п}i})\cos\gamma_{\text{п}i}e^{j\varphi_{\text{п}hi}} + \dot{U}_{\text{ш}};$$

$\mathbf{U}_v$ и $\mathbf{U}_h$ – m-мерные векторы комплексных амплитуд напряжений, действующих в основном и вспомогательных каналах приёма соответствующей поляризации:

$$\mathbf{U}_v = \begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{с}}F(\theta_{\text{с}}) + \\ + \sum_{i=1}^{N}\dot{U}_{\text{п}i}F(\theta_{\text{п}i})\sin\gamma_{\text{п}i}e^{j\varphi_{\text{п}vi}} + \dot{U}_{\text{ш}} \\ \dot{U}_{\text{с}}f(\theta_{\text{с}})e^{j\Delta\varphi_{\text{с}}} + \\ + \sum_{i=1}^{N}\dot{U}_{\text{п}i}f(\theta_{\text{п}i})e^{j\Delta\varphi_{\text{п}i}}\sin\gamma_{\text{п}i}e^{j\varphi_{\text{п}vi}} + \dot{U}_{\text{ш}} \\ \vdots \\ \dot{U}_{\text{с}}f(\theta_{\text{с}})e^{j(m-1)\Delta\varphi_{\text{с}}} + \\ + \sum_{i=1}^{N}\dot{U}_{\text{п}i}f(\theta_{\text{п}i})e^{j(m-1)\Delta\varphi_{\text{п}i}}\sin\gamma_{\text{п}i}e^{j\varphi_{\text{п}vi}} + \\ + \dot{U}_{\text{ш}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{U}_h = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N}\dot{U}_{\text{п}i}F(\theta_{\text{п}i})\cos\gamma_{\text{п}i}e^{j\varphi_{\text{п}hi}} + \\ + \dot{U}_{\text{ш}} \\ \sum_{i=1}^{N}\dot{U}_{\text{п}i}f(\theta_{\text{п}i})e^{j\Delta\varphi_{\text{п}i}}\cos\gamma_{\text{п}i}e^{j\varphi_{\text{п}hi}} + \\ + \dot{U}_{\text{ш}} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{N}\dot{U}_{\text{п}i}f(\theta_{\text{п}i})e^{j(m-1)\Delta\varphi_{\text{п}i}}\cos\gamma_{\text{п}i}e^{j\varphi_{\text{п}hi}} + \\ + \dot{U}_{\text{ш}} \end{bmatrix};$$

$\widetilde{\mathbf{Q}}_v$ и $\widetilde{\mathbf{Q}}_h$ – $(m-1)\times m$-мерные матричные фильтры, структура которых определяется следующими выражениями:

$$\widetilde{\mathbf{Q}}_v = \begin{bmatrix} 1 & q_{1v} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & q_{2v} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & q_{(m-1)v} \end{bmatrix},$$

$$\widetilde{\mathbf{Q}}_h = \begin{bmatrix} 1 & q_{1h} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & q_{2h} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & q_{(m-1)h} \end{bmatrix};$$

$\mathbf{W}_v$ и $\mathbf{W}_h$ – $(m-1)$-мерные весовые векторы СПрО, расположенные в приёмных трактах дополнительных каналов приёма соответствующей поляризации; $\dot{U}_{\text{с}}$ и $\dot{U}_{\text{п}i}$ – комплексные амплитуды напряжений полезного сигнала и i-ого помехового колебания; $F(\theta_{\text{с}})$ и $F(\theta_{\text{п}i})$ – значения диаграммы направленности антенны основного канала в направлениях $\theta_{\text{с}}$ и $\theta_{\text{п}i}$ соответственно; $f(\theta_{\text{с}})$ и $f(\theta_{\text{п}i})$ – значения диаграммы направленности антенн вспомогательных каналов направлениях $\theta_{\text{с}}$ и $\theta_{\text{п}i}$ соответственно (полагаем, что антенны вспомогательных каналов являются идентичными); $\Delta\varphi_{\text{с}}$ и $\Delta\varphi_{\text{п}i}$ – фазовые набеги полезного сигнала и i-ой помехи, обусловленные разносом фазовых центров приёмных антенн; $\gamma_{\text{п}i}$ – угол поляризационного отношения для i-ого помехового колебания; $\varphi_{\text{п}vi}$ и $\varphi_{\text{п}hi}$ – фазовые сдвиги i-ого помехового колебания в ортогонально-поляризованных каналах приёма (v и h), обусловленные видом поляризации принимаемых колебаний; $\dot{U}_{\text{ш}}$ – комплексная амплитуда внутреннего шума (полагаем одинаковой для всех каналов приёма), N – число помеховых колебаний действующих на входе адаптивной пространственно-поляризационной системы.

Выражение (2) позволяет синтезировать структурную схему адаптивной пространственно-поляризационной си-

стемы обработки сигналов с предварительным матричным преобразованием, которая приведена на рис. 1. Здесь учтено, что полезный сигнал согласован по поляризации с антенной системой из вертикально ориентированных облучателей.

Применение матричных фильтров $\widetilde{\mathbf{Q}}_v$ и $\widetilde{\mathbf{Q}}_h$ вызвано необходимостью обеспечить оптимальную факторизацию комбинированной обработки сигналов на пространственную и поляризационную. В случае одномерной факторизации, заключающейся в инвариантной настройке весовых векторов $\mathbf{W}_v$ и $\mathbf{W}_h$ для одного определённого направления θ_0, коэффициенты матричного фильтра могут быть найдены на основании следующих выражений (здесь учтены эквидистантный характер распределения приёмных элементов, а также идентичность характеристик направленности вспомогательных каналов приёма):

$$q_{1v} = q_{1h} = -\frac{F(\theta_0)}{f(\theta_0)} e^{-j\Delta\varphi_0};$$

$$q_{iv} = q_{ih} = -e^{-j\Delta\varphi_0}; \quad i = \overline{2,(m-1)},$$

где $\Delta\varphi_0$ – фазовый набег некоторого опорного колебания между соседними приёмными антеннами (в частности для направления нормали к плоскости раскрыва антенной системы $\Delta\varphi_0 = 0$).

Значения весовых векторов доставляющих минимум дисперсии помехового колебания на выходе СПрО определяются соотношениями:

$$\mathbf{W}_v = -\left(\widetilde{\mathbf{Q}}_v \overline{(\mathbf{U}_v \mathbf{U}_v^{\text{н}})} \widetilde{\mathbf{Q}}_v^{\text{н}}\right)^{-1} \widetilde{\mathbf{Q}}_v \overline{(\mathbf{U}_v U_{v0}^*)}; \quad (3)$$

$$\mathbf{W}_h = -\left(\widetilde{\mathbf{Q}}_h \overline{(\mathbf{U}_h \mathbf{U}_h^{\text{н}})} \widetilde{\mathbf{Q}}_h^{\text{н}}\right)^{-1} \widetilde{\mathbf{Q}}_h \overline{(\mathbf{U}_h U_{h0}^*)}, \quad (4)$$

где $\overline{(\cdot)}$ – обозначает операцию вычисления математического ожидания, "*" – символ операции комплексного сопряжения.

Комплексный весовой коэффициент СПлО можно найти из выражения (2)

$$\dot{K}_{\text{пол}} = -\frac{\overline{\left(\dot{U}_{0v} + \mathbf{W}_v^{\text{н}} \widetilde{\mathbf{Q}}_v \mathbf{U}_v\right)\left(\dot{U}_{0h} + \mathbf{W}_h^{\text{н}} \widetilde{\mathbf{Q}}_h \mathbf{U}_h\right)^{\text{н}}}}{\left(\dot{U}_{0h} + \mathbf{W}_h^{\text{н}} \widetilde{\mathbf{Q}}_h \mathbf{U}_h\right)\left(\dot{U}_{0h} + \mathbf{W}_h^{\text{н}} \widetilde{\mathbf{Q}}_h \mathbf{U}_h\right)^{\text{н}}} \cdot \quad (5)$$

Приведенные аналитические выражения (2) – (5) в совокупности представляют собой математическую модель функционирования адаптивной пространственно-поляризационной системы обработки сигналов с предварительным матричным преобразованием, обеспечивающим выполнение условия одномерной факторизации, представленной на рис. 1.

Для создания имитационной модели рассматриваемой пространственно-поляризационной структуры необходимо воспроизведение процессов, происходящих в исследуемой системе, путём искусственной генерации случайных величин, от которых зависят эти процессы, с помощью датчиков случайных чисел.

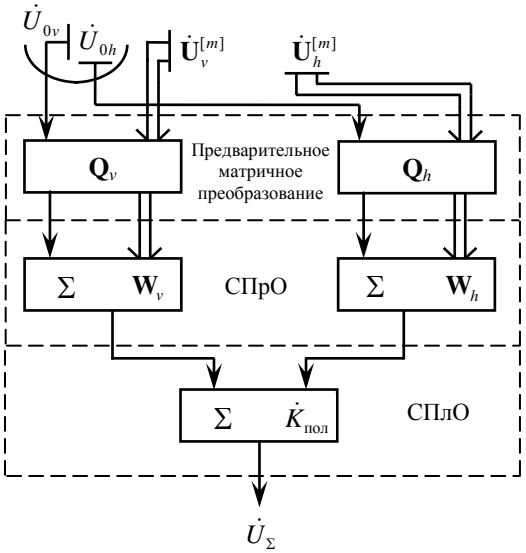


Рис. 1. Адаптивная пространственно-поляризационная система обработки сигналов с предварительным матричным преобразованием

Fig. 1. Adaptive spatial-polarization signal processing system with preliminary matrix transformation

Алгоритм моделирования в этом случае представляет комбинацию детерминированных и стохастических зависимостей. Такая имитационная модель с максимально возможной точностью вос-

производит процессы функционирования исследуемой системы адаптивного приёма сигналов со случайными параметрами на фоне стохастических помех и позволяет судить о правильности разработанных теоретических положений [9].

Для исследования процесса обнаружения полезного сигнала необходимо иметь имитационную модель электромагнитного поля, создаваемого в раскрыве многоканальной антенны источниками случайных сигналов и модель настраивающейся по помехам адаптивной системы приёма.

В точке раскрыва многоканальной антенны, реализации сигнала одного источника соответствует комплексная огибающая поля:

$$\dot{U}(t) = \dot{G}(\theta)\dot{U}_0(t), \qquad (6)$$

где $\dot{G}(\theta)$ – комплексная диаграмма направленности антенны приёмного канала; $\dot{U}_0(t)$ – случайная комплексная амплитуда электромагнитного колебания на входе приёмной антенны.

Представление процесса (6) в виде приемлемом для имитационного моделирования на ЭВМ предполагает замену непрерывного аргумента t на дискретный $t_n = n \cdot \Delta t$, где n – номер текущей выборки входного случайного процесса; Δt – интервал временной дискретизации входного процесса, определяемый по Котельникову [9]. Дискретный аналог выражения (6) для единичного временного интервала Δt имеет вид:

$$\dot{U}(n) = \dot{G}(\theta)\dot{U}_0(n).$$

Будем полагать, что все действующие на входе многоканальной антенной системы сигналы (полезный сигнал и помеховые колебания) описываются гауссовой статистикой. Тогда, комплексную амплитуду выборок случайного процесса можно представить с помощью следующего выражения [10]:

$$\dot{U}_0(n) = \left|\dot{U}_0(n)\right| e^{j\arg\{\dot{U}_0(n)\}}. \qquad (7)$$

Отсчеты комплексной амплитуды подчинены гауссовому распределению в том случае, когда его модульное значение $\left|\dot{U}_0(n)\right|$ имеет распределение Рэлея, а фаза $\varphi(n) = \arg\{\dot{U}_0(n)\}$ распределена равномерно на интервале $0 \div 2\pi$ [9, 10]. Как известно [10], требуемые статистические законы распределения случайных процессов формируются в результате соответствующего преобразования случайной последовательности $X(n)$, распределение которой $p\{X(n)\}$ равномерно на интервале $0 \div 1$:

$$p\{X(n)\} = \begin{cases} 1; & X(n) \in [0,1]; \\ 0; & X(n) \notin [0,1]. \end{cases} \qquad (8)$$

Для имитационного моделирования электромагнитного поля одного источника необходимо использовать две случайные последовательности $X_a(n)$ и $X_\varphi(n)$ с равномерным распределением (8), которые генерируются независимыми датчиками. Тогда рэлеевская амплитуда $\left|\dot{U}_0(n)\right|$ и равновероятная на интервале $0 \div 2\pi$ фаза $\varphi(n) = \arg\{\dot{U}_0(n)\}$ случайного процесса (7) получается как результат следующих преобразований [9, 10]:

$$\left|\dot{U}_0(n)\right| = \sqrt{-2\ln X_a(n)};$$

$$\varphi(n) = 2\pi \cdot X_\varphi(n);$$

$$n = 1,2,3,...$$

С учётом (7) m-мерные векторы комплексных амплитуд напряжений могут быть представлены следующим образом:

$$\mathbf{U}_v^{\mathrm{T}}(n) = \left[\dot{U}_{0v}(n) \quad \dot{U}_{1v}(n) \quad \ldots \quad \dot{U}_{Mv}(n)\right]; \quad (9)$$

$$\mathbf{U}_h^{\mathrm{T}}(n) = \left[\dot{U}_{0h}(n) \quad \dot{U}_{1h}(n) \quad \ldots \quad \dot{U}_{Mh}(n)\right]. \quad (10)$$

Используя разложение векторов комплексных амплитуд (9) и (10) на квадратурные составляющие окончательно получим статистическую модель входных процессов, действующих в приёмных элементах антенной системы

$$\left.\begin{aligned}\mathbf{U}_v(n) &= \mathrm{Re}\{\mathbf{U}_v(n)\} + j\,\mathrm{Im}\{\mathbf{U}_v(n)\}\\ \mathbf{U}_h(n) &= \mathrm{Re}\{\mathbf{U}_h(n)\} + j\,\mathrm{Im}\{\mathbf{U}_h(n)\}\end{aligned}\right\},$$

где $\mathrm{Re}\{\cdot\}$; $\mathrm{Im}\{\cdot\}$ – квадратурные составляющие комплексной огибающей поля в точках приёма.

Представление вектора выборок входных сигналов в виде (7) справедливо для узкополосной в пространственно-временном смысле антенной системы.

Считаем, что настройка весовых коэффициентов СПрО и СПлО осуществляется с использованием корреляционной обратной связи, цифровая модель которой описывается следующими многомерными выражениями:

– для системы с вертикальным (v) расположением приёмных элементов:

$$\mathrm{Re}\{\mathbf{W}_v(n+1)\} = \mathrm{Re}\{\mathbf{W}_v(n)\} - \\ - \mu_{\text{пр}}\,\mathrm{Re}\left\{\left(\begin{matrix}\dot{U}_{0v}(n) + \\ + \mathbf{W}_v^{\text{н}}(n)\widetilde{\mathbf{Q}}_v\mathbf{U}_v(n)\end{matrix}\right)\widetilde{\mathbf{Q}}_v\mathbf{U}_v(n)\right\}; \quad (11)$$

$$\mathrm{Im}\{\mathbf{W}_v(n+1)\} = \mathrm{Im}\{\mathbf{W}_v(n)\} - \\ - \mu_{\text{пр}}\,\mathrm{Im}\left\{\left(\begin{matrix}\dot{U}_{0v}(n) + \\ + \mathbf{W}_v^{\text{н}}(n)\widetilde{\mathbf{Q}}_v\mathbf{U}_v(n)\end{matrix}\right)\widetilde{\mathbf{Q}}_v\mathbf{U}_v(n)\right\}; \quad (12)$$

– для системы с горизонтальным (h) расположением приёмных элементов:

$$\mathrm{Re}\{\mathbf{W}_h(n+1)\} = \mathrm{Re}\{\mathbf{W}_h(n)\} - \\ - \mu_{\text{пр}}\,\mathrm{Re}\left\{\left(\begin{matrix}\dot{U}_{0h}(n) + \\ + \mathbf{W}_h^{\text{н}}(n)\widetilde{\mathbf{Q}}_h\mathbf{U}_h(n)\end{matrix}\right)\widetilde{\mathbf{Q}}_h\mathbf{U}_h(n)\right\}; \quad (13)$$

$$\mathrm{Im}\{\mathbf{W}_h(n+1)\} = \mathrm{Im}\{\mathbf{W}_h(n)\} - \\ - \mu_{\text{пр}}\,\mathrm{Im}\left\{\left(\begin{matrix}\dot{U}_{0h}(n) + \\ + \mathbf{W}_h^{\text{н}}(n)\widetilde{\mathbf{Q}}_h\mathbf{U}_h(n)\end{matrix}\right)\widetilde{\mathbf{Q}}_h\mathbf{U}_h(n)\right\}; \quad (14)$$

– для системы поляризационной обработки сигналов:

$$\mathrm{Re}\{\dot{K}_{\text{пол}}(n+1)\} = \mathrm{Re}\{\dot{K}_{\text{пол}}(n)\} - \\ - \mu_{\text{пол}}\,\mathrm{Re}\{\dot{U}_\Sigma(n)(\dot{U}_{0h} + \mathbf{W}_h^{\text{н}}(n)\widetilde{\mathbf{Q}}_h\mathbf{U}_h(n))\}; \quad (15)$$

$$\mathrm{Im}\{\dot{K}_{\text{пол}}(n+1)\} = \mathrm{Im}\{\dot{K}_{\text{пол}}(n)\} - \\ - \mu_{\text{пол}}\,\mathrm{Im}\{\dot{U}_\Sigma(n)(\dot{U}_{0h} + \mathbf{W}_h^{\text{н}}(n)\widetilde{\mathbf{Q}}_h\mathbf{U}_h(n))\}. \quad (16)$$

где $\mu_{\text{пр}}$, $\mu_{\text{пол}}$ – постоянные, определяющие скорость адаптации и устойчивость алгоритмов в СПрО и СПлО.

При проведении имитационного моделирования будем полагать:

1) В решётке выделен основной канал приёма с высоким коэффициентом направленного действия, диаграмма направленности которого аппроксимируется функцией:

$$|F(\theta)| = \left|\frac{\sin(2\pi l\sin\theta)}{2\pi l\sin\theta}\right|,$$

где l – относительный размер апертуры антенны основного канала, $l = 15$;

2) Количество вспомогательных каналов приёма моделируемой антенной системы равно $M = 5$;

3) Включение дополнительных каналов приёма является несимметричным по отношению к основному каналу приёма, причём относительный разнос фазовых центров антенн вспомогательных каналов $d = 1{,}75$;

4) Коэффициент направленного действия антенн вспомогательных каналов постоянен для всех направлений приёма θ и имеет относительный уровень

$$|f(\theta)|^2 / |F_{\max}(\theta)|^2 = -10\ \text{дБ};$$

5) Кроссполяризационная диаграмма при моделировании не учитывалась;

6) В процессе моделирования имитировался отражённый от гидрометеоров вертикально-поляризованный импульсный сигнал со случайной амплитудой и начальной фазой, причём время появления сигнала соответствует 5000-ой итерации, а его длительность, зависящая от радиальной протяжённости облака гидрометеоров составляет 2000 временных отсчётов;

7) Приём полезного сигнала осуществляется в направлении $\theta_{\text{с}} = 0^\circ$. Энергетическое отношение сигнал/внутренний шум в основном канале приёма составляет $q_{\text{с}} = 10$ дБ;

8) Моделировались две помеховые ситуации (№ 1 и № 2), характеризуемые наличием регулярно-поляризованных шумовых помех и условиями, представленными в табл. 1;

9) В исследуемой адаптивной системе пространственно-поляризационной обработки сигналов для обеспечения оптимальной одномерной факторизации выбрано направление: $\theta_0 = 0^\circ$;

10) Адаптивное управление СПрО и СПлО проводится по итерационным алгоритмам (11)–(16), где соответствующие шаги адаптации цепей управления СПрО ($\mu_{\text{пр}}$) и СПлО ($\mu_{\text{пол}}$) равны:

$$\mu_{\text{пр}} = 2 \cdot 10^{-6}; \ \mu_{\text{пол}} = 5 \cdot 10^{-6}.$$

Таблица 1. Параметры помеховых колебаний, используемых при проведении имитационного моделирования

ПС, №	Относительная мощность помех	Положение источников помех	Параметры поляризации помех ($\gamma_{\text{п}i}$; $\Delta\varphi_{\text{п}i}$)
1.	q_1=44 дБ q_2=27 дБ q_3=34 дБ	θ_1=-5° θ_2=0° θ_3=3°	$\gamma_{\text{п}1}$=45°; $\Delta\varphi_{\text{п}1}$=45° $\gamma_{\text{п}2}$=45°; $\Delta\varphi_{\text{п}2}$=90° $\gamma_{\text{п}3}$=135°; $\Delta\varphi_{\text{п}3}$=90°
2.	q_1=37 дБ q_2=23 дБ q_3=43 дБ	θ_1=-3° θ_2=0° θ_3=7°	$\gamma_{\text{п}1}$=30°; $\Delta\varphi_{\text{п}1}$=30° $\gamma_{\text{п}2}$=55°; $\Delta\varphi_{\text{п}2}$=0° $\gamma_{\text{п}3}$=120°; $\Delta\varphi_{\text{п}3}$=60°

В ходе имитационного моделирования количественно оценивалась дисперсия выходного скалярного случайного процесса $\dot{U}_\Sigma(n)$, равного (2) и представляющего результат адаптивной весовой обработки выборок входных векторов полезного сигнала, помехи и внутреннего шума.

Процесс настройки градиентных адаптивных фильтров (11)–(16) системы обработки сигналов является нестационарным, и поэтому оценка дисперсии выходной выборки проводилась по результатам многократного повторения независимых опытов для каждого шага адаптации n. N_Σ-кратное повторение независимых испытаний для различных шагов адаптации n даёт ряд дискретных значений оценок дисперсии [7–9]:

$$\widehat{\sigma}^2_\Sigma(n) = \frac{1}{N_\Sigma} \sum_{i=1}^{N_\Sigma} \left\{ \left| \dot{U}_\Sigma(n) \right|^2 \right\}_i , \qquad (17)$$

где $\left| \dot{U}_\Sigma(n) \right|^2 = \left| \text{Re}\left\{ \dot{U}_\Sigma(n) \right\} \right|^2 + \left| \text{Im}\left\{ \dot{U}_\Sigma(n) \right\} \right|^2$.

В частности, применение алгоритма (17) правомерно также для стационарного эргодического случайного процесса [9, 10], что позволяет оценить дисперсию внутреннего шума основного канала приёма системы обработки сигналов, как:

$$\widehat{\sigma}^2_{\text{ш}}(n) = \frac{1}{N_\Sigma} \sum_{i=1}^{N_\Sigma} \left\{ \left| \dot{U}_{0\text{ш}v0}(n) \right|^2 \right\}_i .$$

По результатам имитационного моделирования были построены зависимости относительной дисперсии процесса $q_\Sigma(n)$ на выходе исследуемой системы обработки сигналов от номера шага адаптации n, при фиксированном объёме N_Σ выборки независимых испытаний на каждом шаге n. Эти зависимости определены, как

$$q_\Sigma(n) = 10 \lg \frac{\widehat{\sigma}^2_\Sigma(n)}{\widehat{\sigma}^2_{\text{ш}}(n)} . \qquad (18)$$

Установившийся после переходного процесса относительный уровень шумовой помехи на выходе имитационной модели исследуемой адаптивной системы приёма сравнивался с теоретическим пределом q_0, который получен путём аналитических расчётов, с использованием выражений (2)–(5) и обозначен на графиках пунктирной линией. Так, для помеховой ситуации № 1 (ПС№1) значение $q_0 = 2{,}1$ дБ, а для помеховой ситуации № 2 (ПС№2) $q_0 = 3{,}8$ дБ.

Значения выходной величины (18) исследуемой пространственно-поляризационной системы обработки сигналов получены для выборки объёма $N_\Sigma = 300$.

На рис. 2 и рис. 3 приведены результаты имитационного моделирования пе-

реходных процессов, отражающих изменение величины (18) на выходе комбинированной пространственно-поляризационной системы обработки сигналов с предварительным матричным преобразованием.

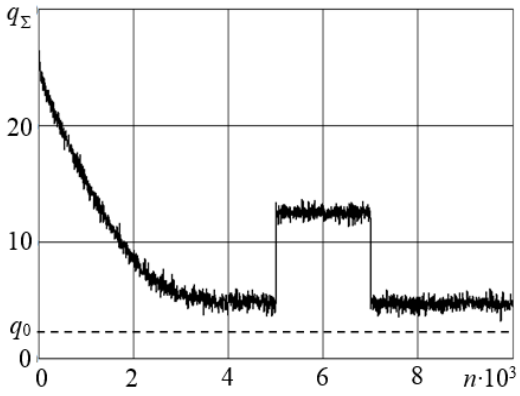


Рис. 2. Зависимость относительной дисперсии случайного процесса на выходе адаптивной системы q_Σ от номера шага итерации n сигнала в условиях помеховой ситуации № 1

Fig. 2. The dependence of the relative variance of the random process at the output of the adaptive system on the number of the signal iteration step in the conditions of interference situation No. 1

Рис. 2 соответствует помеховой ситуации № 1, а рис. 3 соответствует помеховой ситуации № 2.

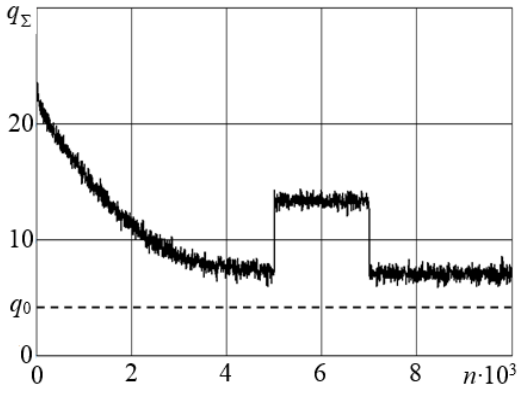


Рис. 3. Зависимость относительной дисперсии случайного процесса на выходе адаптивной системы q_Σ от номера шага итерации n сигнала в условиях помеховой ситуации № 2

Fig. 3. Dependence of the relative variance of the random process at the output of the adaptive system on the number of the signal iteration step in the conditions of the interference situation No. 2

Заключение. 1. Разработанная на основе гауссово-параметрической аппроксимации статистик входных выборок имитационная модель позволяет исследовать в динамике процесс обнаружения сигналов, отражённых от атмосферных гидрометеоров на фоне шумовых помех с регулярной поляризацией.

2. Результаты имитационного моделирования, представленные в виде зависимостей $q_\Sigma(n)$ на рис. 2 и рис. 3 иллюстрируют возможность устойчивого выделения импульсного протяжённого сигнала от атмосферных гидрометеоров на выходе адаптивной пространственно-поляризационной системы с предварительным матричным преобразованием в условиях произвольного расположения источников помеховых колебаний.

3. Меньшее значение относительного превышения уровня полезного сигнала над помеховым фоном на рис. 3 по сравнению с рис. 2 объясняется уменьшением нормы вектора поляризационных различий между полезным сигналом и помехой, действующей в главном лепестке ДНА основных каналов.

4. Приведенные результаты согласуются с теоретическими положениями, о чём свидетельствует сходимость $q_\Sigma(n)$ к теоретическому пределу q_0.

В данной научной статье построена имитационная модель комбинированной системы пространственно-поляризационной обработки сигналов, в которой использована одномерная факторизация, (одно направление инвариантной настройки весовых векторов пространственных подсистем) выполненная на основе невырожденного матричного преобразования. Однако, в реальных условиях могут наблюдаться пространственные флюктуации источников помеховых колебаний, что приведёт к ощутимой потери эффективности предложенной модели. Кроме того, в общем случае статистика входных случайных процессов может существенно отличаться от гауссового распределения. Всё это в совокупности предопределяет вектор последующих научных исследований. Так, несомненно, значительный научный

и практический интерес будет представлять исследование вопросов, связанных с построением имитационной модели систем пространственно-поляризационной обработки случайных процессов с негауссовой статистикой, в которых используется многомерная факторизация обработки, причём её техническая реализация может осуществляться иными возможными методами (например, на основе метода Лагранжа).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Киселев В.Н., Кузнецов А.Д.* Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). Учебник. СПб.: изд. РГГМУ, 2004. 429 с.

2. *Горбатенко В.П., Слуцкий В.И., Бычкова Л.Н.* Метеорологический радиолокатор МРЛ-5: производство наблюдений. Диагноз н прогноз опасных явлений погоды: Учебное пособие. Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. 120 с.

3. *Радиоэлектронные* системы: основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин / под ред. Я.Д. Ширмана. М.: ЗАО МАКВИС, 1998. 828 с.

4. *Григорьев В.А.* Комбинированная обработка сигналов в системах радиосвязи. М.: Эко-Трендз, 2002. 264 с.

5. *Ратынский М.В.* Адаптация и сверхразрешение в антенных решётках. М.: Радио и связь, 2003. 200 с.

6. *Методы* обработки сигналов при наличии помех в линиях связи / Е.Ф. Камнев, Н.Е. Кириллов, Н.И. Кобин и др. / под ред. Е.Ф. Камнева. М.: Радио и связь, 1985. 224 с.

7. *Джиган В.И.* Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 527 с.

8. *Котоусов А.С., Морозов А.К.* Оптимальная фильтрация сигналов и компенсация помех. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 166 с.

9. *Монаков А.А.* Основы математического моделирования радиотехнических систем. СПб.: ГУАП, 2005. 100 с.

10. *Тихонов В.И., Харисов В.Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2004. 608 с.

STATISTICAL MODEL OF ADAPTIVE SYSTEM COMPENSATION OF NOISE INTERFERENCE IN THE RADAR WHEN DETECTING HYDROMETEOROLOGICAL FORMATIONS IN THE ATMOSPHERE

Yu.M. Popovnin, D.M. Puzanov, V.F. Grishko

The Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov,
RF, Sevastopol, Dybenko St., 1a

A simulation model of an adaptive combined spatial-polarization system for detecting hydrometeorological formations in the atmosphere are created. The creation of this model is based on statistical modeling of both the electromagnetic field created by a useful signal and interference vibrations and the configurable parameters of the system under study. The laws of distribution of input random processes are described by Gaussian statistics. The adaptation of the weighting coefficients to the interference situation is carried out using a gradient algorithm. The dependences of the relative dispersion of the process at the output of the system under study on the number of the adaptation step are constructed, which indicate high efficiency of detecting the reflected signal from hydrometeors under the influence of noise interference arbitrarily oriented in space.

Keywords: hydrometeors, complex weight coefficient of the polarization processing system, nonstationary random process, estimation of the variance of the output sample.

REFERENCES

1. *Kiselev V.N. and Kuznecov A.D.* Metody zondirovanija okruzhajushhej sredy (atmosfery) (Methods of sounding the environment (atmosphere)), Saint-Petersburg: Izd-vo RGGMU, 2004, 429 p.

2. *Gorbatenko V.P., Sluckij V.I., and Bychkova L.N.* Meteorologicheskij radiolokator MRL-5: proizvodstvo nabljudenij. Diagnoz n prognoz opasnyh javlenij pogody (Meteorological radar MRL-5: production of observations. Diagnosis and forecast of dangerous weather phenomena), Tomsk: Izd-vo "TML-Press", 2007, 120 p.

3. *Shirman Ja.D., Losev Ju.I., and Minervin N.N.* Radiojelektronnye sistemy: osnovy postroenija i teorija. Spravochnik (Radioelectronic systems: fundamentals of construction and theory. Reference book), Moscow: ZAO MAKVIS, 1998, 828 p.

4. *Grigor'ev V.A.* Kombinirovannaja obrabotka signalov v sistemah radiosvjazi (Combined signal processing in radio communication systems), Moscow: Jeko-Trendz, 2002, 264 p.

5. *Ratynskij M.V.* Adaptacija i sverhrazreshenie v antennyh reshjotkah (Adaptation and superresolution in antenna arrays), Moscow: Radio i svjaz', 2003, 200 p.

6. *Kamnev E.F., Kirillov N.E., and Kobin N.I.* Metody obrabotki signalov pri nalichii pomeh v linijah svjazi (Methods of signal processing in the presence of interference in communication lines), Moscow: Radio i svjaz', 1985, 224 p.

7. *Dzhigan V.I.* Adaptivnaja fil'tracija signalov: teorija i algoritmy (Adaptive signal filtering: theory and algorithms), Moscow: Tehnosfera, 2013, 527 p.

8. *Kotousov A.S. and Morozov A.K.* Optimal'naja fil'tracija signalov i kompensacija pomeh (Optimal signal filtering and interference compensation), Moscow: Gorjachaja linija-Telekom, 2008, 166 p.

9. *Monakov A.A.* Osnovy matematicheskogo modelirovanija radiotehnicheskih sistem (Fundamentals of mathematical modeling of radio engineering systems), Saint-Petersburg: GUAP, 2005, 100 p.

10. *Tihonov V.I. and Harisov V.N.* Statisticheskij analiz i sintez radiotehnicheskih ustrojstv i sistem: (Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems), Moscow: Radio i svjaz', 2004, 608 p.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Агаркова-Лях И.В. 86
Азаренко Е.И. 66
Аминова Э.К. 43
Андреева Н.А. 74
Герасимов А.Р. 49
Греков А.Н. 112
Гришко В.Ф. 121
Гутник В.С. 66
Гутник С.А. 66
Идрисова В.А. 43
Исламутдинова А.А. 43
Кабанов А.А. 112
Кадыров Р.Р. 81
Кичигин И.А. 81
Кравцова С.Е. 105
Краснодубец Л.А. 56
Лапа М.В. 105
Лукина Л.И. 28
Моисеев Д.В. 28
Ничкова Л.А. 49, 66
Овсянникова И.В. 81
Осадчая Л.И. 49
Поповнин Ю.М. 121
Пузанов Д.М. 121
Пряничникова В.В. 81
Сафонов В.А. 105
Сигора Г.А. 66
Степанова О.А. 20
Федотов А.Б. 15
Хоменко Т.Ю. 66
Чернова А.С. 43
Шенин Д.С. 49
Шоларь С.А. 20
Шугаепов И.Р. 81
Щербина В.Г. 94
Яппаров Б.А. 81
Polonsky A. 5
SUN Jiyu 5
ZHU Zemin 5
SONG Jun 5
GUO Junru 5
CAI Yu 5
FU Yanzhao 5
Wang Linhui 5

Системы контроля окружающей среды
Выпуск 1 (47)

Monitoring systems of environment
Issue 1 (47)

Адрес редакции:
Институт природно-технических систем (ИПТС)
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: skos.sevastopol@inbox.ru
Тел.: +7 (8692) 54-44-10
http://www.ИПТС.рф

Технические редакторы: И.Г. Шмырева, С.В. Малахатко

Подписано к печати 21.03.2022
Выход в свет 28.03.2022
Заказ 23. Тираж 100 экз.
Распространяется бесплатно

Отпечатано ИК ИПТС
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
ОГРН 1022302946489 от 24.05.2012
Тел.**: +7** (8692) 54-44-10
ph@instpts.ru