

# Вестник Московского университета

Серия 5 ГЕОГРАФИЯ

Издательство Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

2023 • Т. 78 • № 6

НОЯБРЬ–ДЕКАБРЬ

Выходит один раз в два месяца

*Посвящается 270-летию Московского государственного  
университета имени М.В. Ломоносова*

## СОДЕРЖАНИЕ

### **География и экология**

- Кондратьев С.И., Орехова Н.А. Потенциальные угрозы экологическому состоянию  
вод Севастопольской бухты..... 3
- Тихонов А.С., Харитонов Т.И. Ландшафтно-экологический потенциал пустырей  
города Астрахани..... 15
- Куrolap C.A., Сарычев Д.В., Попова И.В. Дистанционное зондирование источников  
теплового загрязнения города Липецка..... 27

### **Методы географических исследований**

- Бабкин Р.А., Махрова А.Г. Объединенные города Московской области: результат  
эволюционного развития или административных преобразований..... 38
- Андреев Т.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Энергетический потенциал  
агробиомассы в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях..... 50

### **Динамика природных процессов**

- Чалов Р.С., Камышев А.А., Куракова А.А., Голубцов Г.Б. Формирование  
разветвлений на излучинах русел рек..... 64
- Леонов А.В., Архипкин В.С., Пицальник В.М., Латковская Е.М. Моделирование  
динамики концентрации растворенного кислорода в водах залива Анива  
(Охотское море)..... 77
- Кондрин А.Т., Короблина А.Д. Сгонно-нагонные колебания уровня Белого моря  
по данным наблюдений 2004–2020 гг..... 86

### **Эволюционная география**

- Семиколеных Д.В., Курбанов Р.Н., Янина Т.А. Ингрессия Карангатского моря  
в Манычскую депрессию (поздний плейстоцен)..... 96
- Болитовская Н.С., Ульянов В.А., Шуньков М.В. Палиноклиматостратиграфия и условия  
формирования плейстоценовых отложений пещеры Трлица (Черногория)..... 107

### **Региональные исследования**

- Клювиткина Т.С., Агафонова Е.А., Новичкова Е.А., Лозинская Л.А., Чеховская М.П.,  
Матуль А.Г., Кравчишина М.Д. Условия осадконакопления в районе хребта  
Книповича (Норвежское море) в голоцене по данным анализа микрофоссилий..... 119

### **Краткие сообщения**

- Савенко А.В., Савенко В.С., Ефимов В.А. Современное содержание фтора в водах реки Оби..... 132
- Трифонов Т.А., Селиванов О.Г., Марцев А.А., Курочкин И.Н., Курбатов Ю.Н.,  
Романова Л.Н. Оценка химического загрязнения поверхностных вод  
городского округа Владимир..... 139

## CONTENTS

### **Geography and ecology**

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Kondratev S.I., Orekhova N.A.</i> Potential threats to the ecological state of water in the Sevastopol Bay.....       | 3  |
| <i>Tikhonov A.S., Kharitonova T.I.</i> Landscape and ecological potential of vacant lands in the city of Astrakhan.....  | 15 |
| <i>Kurolap S.A., Sarychev D.V., Popova I.V.</i> Remote sensing of heat pollution sources in the Lipetsk urban area ..... | 27 |

### **Methods of geographical studies**

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Babkin R.A., Makhrova A.G.</i> United cities of the Moscow region: the result of evolutionary development or administrative transformations..... | 38 |
| <i>Andreenko T.I., Kiseleva S.V., Rafikova Yu.Yu.</i> Energy potential of agrobiomass in Krasnodar, Stavropol and Rostov regions.....               | 50 |

### **Dynamics of natural processes**

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Chalov R.S., Kamyshev A.A., Kurakova A.A., Golubtsov G.B.</i> Formation of branches at river meanders.....                                                                       | 64 |
| <i>Leonov A.V., Arkhipkin V.S., Pishchalnik V.M., Latkovskaya E.M.</i> Modeling the dynamics of dissolved oxygen concentration in waters of the Aniva bay (the Sea of Okhotsk)..... | 77 |
| <i>Kondrin A.T., Korablina A.D.</i> White Sea surge level fluctuations according to observation data 2004–2020.....                                                                 | 86 |

### **Evolutionary geography**

|                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Semikolennykh D.V., Kurbanov R.N., Yanina T.A.</i> Ingression of the Karangatan Sea into the Manych depression (late Pleistocene).....                               | 96  |
| <i>Bolikhovskaya N.S., Ul'yanov V.A., Shun'kov M.V.</i> Palynoclimatostratigraphy and formation conditions of Pleistocene deposits in the Trlica cave (Montenegro)..... | 107 |

### **Regional studies**

|                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Klyuvitkina T.S., Agafonova E.A., Novichkova E.A., Lozinskaia L.A., Chekhovskaya M.P., Matul A.G., Kravchishina M.D.</i> Holocene sedimentation history of the Knipovich ridge area (the Norwegian Sea) based on the analysis of microfossils..... | 119 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### **Short communications**

|                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Savenko A.V., Savenko V.S., Efimov V.A.</i> Present-day fluorine concentration in the Ob river water.....                                                              | 132 |
| <i>Trifonova T.A., Selivanov O.G., Martsev A.A., Kurochkin I.N., Kurbatov Yu.N., Romanova L.N.</i> Assessment of chemical pollution of the surface water in Vladimir..... | 139 |



## ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 551.464.34

### ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ УГРОЗЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ ВОД СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ

С.И. Кондратьев<sup>1</sup>, Н.А. Орехова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»,  
отдел биогеохимии моря, Севастополь*

<sup>1</sup> *Ст. науч. сотр., канд. хим. наук; e-mail: skondratt@mail.ru*

<sup>2</sup> *Канд. геогр. наук, заведующий Лабораторией мониторинга и исследования парниковых газов и кислорода  
в морской среде; e-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ru*

Целью данной работы является обсуждение основных экологических проблем состояния вод Севастопольской бухты и выявление причин, влияющих на это состояние. Четыре сезонные съемки акватории Севастопольской бухты в 2022 г. подтвердили основополагающее влияние на гидрохимический состав вод бухты стока реки Черной, который служит одним из основных источников биогенных элементов.

При этом отмечено, что на гидрохимические характеристики вод Южной бухты преимущественное влияние оказывают не воды реки Черной, а пресноводный сток в кутовой части данного района. Предположено, что этот сток является постоянным, а не аварийным, как считали ранее. При ветрах южного румба возможно распространение вод Южной бухты к центральной части Севастопольской бухты, что негативно отразится на состоянии ее экосистемы.

В летний период в кутовой части Артиллерийской бухты, рядом с которой находится городской пляж «Хрустальный», зафиксировано появление дополнительного источника ионов аммония, концентрация которых в 80 раз превышала фоновую. Так как аммоний является продуктом окисления органического вещества, его появление может указывать на преобладание деструкционных процессов, что негативно отражается на условиях существования биологических организмов и в целом на экологическом состоянии вод.

В теплое время года на акватории Севастопольской бухты в придонных водах искусственно созданного углубления под плавучим доком наблюдается постоянный дефицит кислорода, который в некоторых случаях приводит к образованию сероводорода.

Все отмеченные угрозы негативно отражаются на условиях существования биологических организмов, экологическом состоянии всей экосистемы и рекреационном потенциале бухты.

**Ключевые слова:** гидрохимический состав вод, экология, сероводородное загрязнение, натурные данные

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.1

#### ВВЕДЕНИЕ

Исследование гидрохимического состава вод Севастопольской бухты началось относительно недавно, в конце XX в. Постепенно были выявлены основные факторы, определяющие гидрологический и гидрохимический режимы вод бухты, а также определены некоторые районы, экологическое состояние которых вызывало опасение. В данной работе на базе результатов четырех сезонных экспедиций (зима, весна, лето, осень), предпринятых в 2022 г., обсуждаются конкретные потенциальные угрозы экологическому состоянию вод бухты.

Севастопольская бухта представляет собой полузамкнутый водоем эстуарного типа с ограничен-

ным водообменом с открытой частью моря. Ее протяженность с запада на восток составляет примерно 7,5 км, при ширине от 100 м в восточной части до 800 м в районе выхода из бухты. Примерно в 2 км от входа в бухту имеется ответвление на юг протяженностью около 2,5 км и шириной от 500 м на входе до 100 м в кутовой части, этот район называют Южной бухтой [Иванов и др., 2006].

В 1970-х гг. при входе в бухту были возведены два мола, защищающих ее от юго-западных штормов, в результате чего ширина входа уменьшилась почти в два раза — до 550 м. Это привело к ослаблению течения, направленного на восток вдоль южного берега центральной части бухты,

что заметно ухудшило «вентилирование» вод бухты водами открытого моря – величина водообмена снизилась на 40–70% [Иванов и др., 2006]. В настоящее время направление течений в бухте определяется преимущественно ветрами, которые или приносят в бухту поверхностные воды открытого моря, и тогда возникает компенсационное течение придонных вод из бухты, или же, наоборот, поверхностные воды бухты уходят в открытое море, а компенсационное течение приносит придонные воды [Совга и др., 2022].

Активное использование в течение двух веков Севастопольской бухты в народно-хозяйственных целях привело к снижению ее рекреационных возможностей. Застройка берегов бухты сопровождалась активной эксплуатацией ее экосистемы в качестве зоны активного судоходства, стоянки и ремонта судов. В итоге сложилась ситуация, когда в акватории бухты возникло более 30 локальных источников хозяйственных, канализационных и ливневых стоков (рис. 1) [Грузинов и др., 2019; Рябцев и др., 2021].

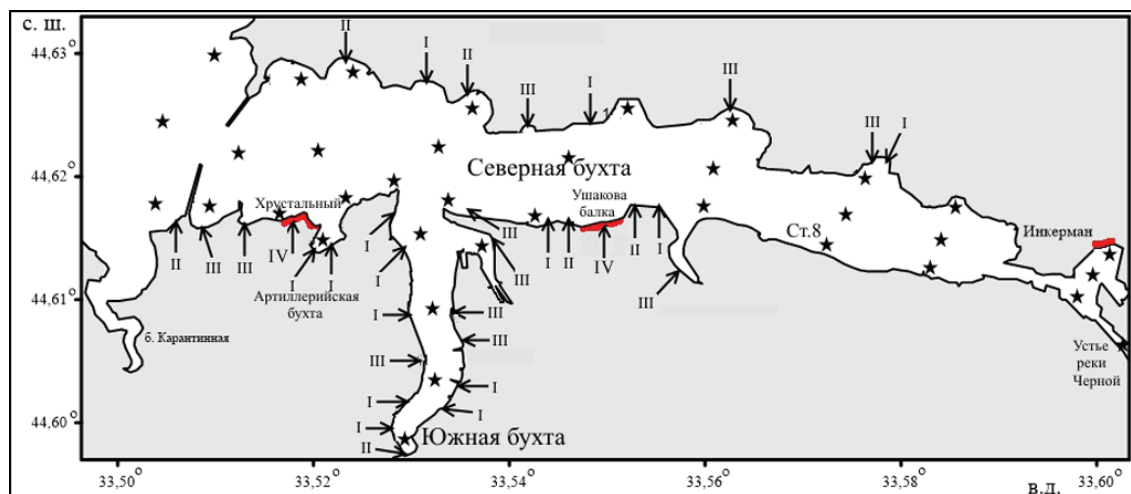


Рис. 1. Расположение различных стоков по [Грузинов и др., 2019] и схема 36 станций отбора проб (отмечены звездочками) в Севастопольской бухте:

I – выпуск сточных вод ливневой канализации; II – аварийный выпуск сточных вод без очистки;  
III – выпуск сточных вод без очистки; IV – действующие пляжи

Fig. 1. Location of various effluents according to [Gruzinov et al., 2019] and a scheme of 36 sampling stations (marked with asterisks) in the Sevastopol Bay:

I – discharge of storm sewer wastewater; II – emergency release of wastewater without treatment;  
III – release of wastewater without treatment; IV – active beaches

Одним из важных факторов, определяющих экологическое состояние бухты, является пресноводный сток в кутовые части «центральной» и Южной бухт, куда пресные воды поступают постоянно с различной интенсивностью в зависимости от сезона. В кутовую часть бухты впадает река Черная, в Южную, по данным [Грузинов и др., 2019; Рябцев и др., 2021], выходит аварийный выпуск сточных вод, однако объем поступающих вод не установлен. При этом в данном районе нами постоянно фиксируется присутствие менее соленых вод в поверхностном слое по сравнению с придонным слоем и остальными районами бухты.

По данным многолетних исследований [Иванов и др., 2006; Овсяный и др., 2007; Багаев и др., 2022; Совга, Хмара, 2020; Орехова и др., 2018; Орехова, Вареник, 2018; Орехова и др., 2019] установлено, что сток реки Черной оказывает основное влияние на гидролого-гидрохимический состав вод всей Се-

вастопольской бухты. При этом вклад пресноводного стока в кутовой части Южной бухты не изучался, хотя, как будет показано ниже, он в значительной степени влияет на гидрохимические характеристики и экологическое состояние вод Южной бухты.

Подробное изучение экологии вод началось только в конце 1990-х гг., до этого исследования Севастопольской бухты были ограничены. Обобщающим трудом десятилетних исследований стал препринт [Иванов и др., 2006], в котором, прежде всего, было обосновано определяющее влияние стока реки Черной на состав вод, а также проведено районирование бухты по уровню загрязнения различными биохимическими компонентами.

Качественные изменения в изучении состояния вод и донных осадков Севастопольской бухты произошли в 2007 г., когда Морским гидрофизическим институтом (МГИ) были организованы ежеквартальные экспедиции не только в акватории бухты,

но и в нижнем течении реки Черной. При этом количество точек отбора проб в бухте было увеличено до 36, что позволило регулярно получать данные о гидролого-гидрохимических характеристиках вод не только на фарватере бухты, но и в прибрежных районах (см. рис. 1).

Систематические исследования вод бухты позволили выделить в ней наиболее неблагоприятные районы. В частности, в районе ст. 8 в придонных водах в сентябре 2009 г. на глубине 20 м был обнаружен сероводород с концентрацией около 40 мкМ [Кондратьев, Видничук, 2020]. Для сравнения, воды Черного моря содержат сероводород в такой концентрации примерно на глубине 250 м [Кондратьев, Видничук, 2018]. Данное явление носило эпизодический характер, однако проблема развития дефицита кислорода и гипоксии (концентрация кислорода менее 63 мкМ, или 30% насыщения [Diaz, 2001; Zhang et al., 2010]), в придонном слое вод в данном районе приобрела сезонный характер [Кондратьев, Видничук, 2020].

С тех пор на основании данных, полученных МГИ для вод реки Черной, вод и донных осадков Севастопольской бухты, были опубликованы многочисленные работы [Багаев и др., 2022; Совга, Хмара, 2020; Орехова и др., 2018; Орехова, Вареник, 2018; Орехова и др., 2019; Кондратьев, Видничук, 2020], проведено районирование акватории бухты по степени загрязнения.

Целью данной работы стало обобщение выводов всех проведенных исследований, оценка наиболее экологически неблагополучных районов бухты и выявление причин, которые создают угрозы для экологии бухты. При этом были использованы данные 2022 г. по содержанию гидрохимических компонентов в водах бухты.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Четыре сезонных съемки Севастопольской бухты по схеме из 36 станций (см. рис. 1), были проведены в феврале, апреле, сентябре и ноябре 2022 г. Пробы отбирались на двух горизонтах – с поверхности и на глубине 1 м от дна. Далее они доставлялись в стационарную береговую лабораторию и немедленно анализировались. Перед анализом растворенных минеральных форм биогенных элементов (кремниевая кислота, фосфаты, нитраты, нитриты, аммоний) пробы морской воды предварительно фильтровались через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм. Далее все пробы, в том числе и на определение концентрации ионов аммония, анализировались фотометрически согласно [Методы..., 1978; Современные методы..., 1992]. Величину pH определяли потенциометрически в открытой ячейке с калибровкой по буферным растворам шкалы NBS,

общую щелочность – методом прямого титрования с потенциометрическим окончанием.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности гидрохимического состава вод Севастопольской бухты в значительной степени определяются пресноводным стоком реки Черной и пресноводного источника, впадающего в кутовую часть Южной бухты. Таким образом, основное внимание при оценке антропогенного влияния обращено на пространственно-временную изменчивость гидрохимических характеристик поверхностного слоя вод бухты (табл.). В придонном слое вод изменения этих характеристик менее контрастны и проявлялись преимущественно в теплый период (август – сентябрь), когда состав вод на ст. 8 под плавучим доком традиционно отличался от ближайших станций – повышенное содержание биогенных элементов и дефицит кислорода.

Максимальные концентрации элементов главного биогенного и карбонатных циклов в поверхностных водах бухты следует ожидать в феврале, когда скорость их извлечения в процессе фотосинтеза минимальна.

В этот период влияние реки Черной на гидрохимические характеристики вод бухты максимально, что наилучшим образом отражается на распределении величины щелочности (рис. 2). В приустьевом районе реки Черной наблюдается максимальная для бухты величина щелочности (около 4 мМ), по мере удаления от устья к выходу из бухты она плавно уменьшается до 3,5 мМ. При этом отмечается монотонное уменьшение величины щелочности с глубиной (см. рис. 2Б). То есть можно отметить, что приустьевой район служит своеобразным фильтром, ослабляющим поступление в бухту различных веществ с речным стоком.

Среди элементов главного биогенного цикла в работе рассматриваются изменения концентраций фосфатов, кремниевой кислоты, нитратов и ионов аммония в поверхностном слое вод. Так как распределение нитратов и нитритов аналогично, последние не обсуждаются, однако их концентрация на порядок меньше. На всех приводимых ниже рисунках следует обратить внимание на повышенные концентрации биогенных элементов в кутовой части Южной бухты.

На рис. 3 показано изменение содержания фосфатов в поверхностных водах Севастопольской бухты в 2022 г. В зимний период происходит накопление фосфатов и наблюдаются их повышенные концентрации (0,09–0,94 мкМ, средняя – 0,22 мкМ). Максимальные концентрации отмечены в кутовой части Южной бухты, повышенные – в устье реки Черной.

Весной их содержание значительно снижается, до ~0,04 мкМ. Максимальные концентрации также отмечаются в кутовой части Южной бухты и устье реки Черной (0,25 мкМ). К осени (сентябрь) в боль-

шей части бухты содержание фосфатов преимущественно ниже предела обнаружения (0,02 мкМ), а в ноябре начинается постепенное увеличение концентраций до 0,05–0,10 мкМ.

Таблица

## Результаты химического анализа вод в Севастопольской бухте в 2022 г.

| Время съёмки           |             | Февраль     |         |       | Апрель      |         |       |
|------------------------|-------------|-------------|---------|-------|-------------|---------|-------|
| Элемент                | Горизонт    | Пределы     | Среднее | σ     | Пределы     | Среднее | σ     |
| Кислород, мл/л         | поверхность | 6,95–8,41   | 7,59    | 0,26  | 5,91–8,23   | 7,06    | 0,32  |
|                        | дно         | 2,62–7,44   | 6,73    | 0,74  | 3,97–7,43   | 6,82    | 0,62  |
| Кислород, насыщение, % | поверхность | 91,1–103,5  | 97,5    | 2,33  | 90,4–117,7  | 105,2   | 4,1   |
|                        | дно         | 34,7–98,3   | 90,3    | 10,1  | 56,4–108,4  | 96,8    | 9,1   |
| Фосфаты, мкМ           | поверхность | 0,09–0,94   | 0,22    | 0,14  | 0,00–0,59   | 0,04    | 0,11  |
|                        | дно         | 0,05–0,26   | 0,14    | 0,06  | 0,00–0,08   | 0,02    | 0,02  |
| Кремнекислота, мкМ     | поверхность | 7,21–61,2   | 21,1    | 11,1  | 2,67–75,3   | 8,8     | 14,2  |
|                        | дно         | 4,69–20,2   | 7,34    | 2,91  | 2,31–6,02   | 4,09    | 0,74  |
| Нитраты, мкМ           | поверхность | 2,62–379,4  | 22,5    | 61,8  | 2,14–301,2  | 16,4    | 50,4  |
|                        | дно         | 0,03–20,41  | 3,69    | 3,70  | 0,00–13,7   | 1,77    | 2,37  |
| Нитриты, мкМ           | поверхность | 0,07–1,33   | 0,33    | 0,21  | 0,07–1,62   | 0,32    | 0,28  |
|                        | дно         | 0,05–0,47   | 0,26    | 0,12  | 0,00–0,37   | 0,17    | 0,10  |
| Аммоний, мкМ           | поверхность | 0,49–4,11   | 1,92    | 0,86  | 0,07–5,29   | 0,72    | 1,02  |
|                        | дно         | 0,36–2,43   | 0,86    | 0,44  | 0,00–0,86   | 0,29    | 0,22  |
| Щелочность, мг-экв/кг  | поверхность | 3,411–3,984 | 3,567   | 0,147 | 3,362–4,082 | 3,486   | 0,160 |
|                        | дно         | 3,377–3,567 | 3,417   | 0,035 | 3,361–3,471 | 3,387   | 0,024 |
| Время съёмки           |             | Сентябрь    |         |       | Ноябрь      |         |       |
| Кислород, мл/л         | поверхность | 4,22–5,40   | 5,00    | 0,31  | –           | –       | –     |
|                        | дно         | 2,39–5,32   | 4,68    | 0,57  | –           | –       | –     |
| Кислород, насыщение, % | поверхность | 79,1–101,6  | 93,1    | 6,0   | –           | –       | –     |
|                        | дно         | 44,0–100,0  | 86,4    | 11,3  | –           | –       | –     |
| Фосфаты, мкМ           | поверхность | 0,00–3,75   | 0,23    | 0,74  | 0,01–1,75   | 0,15    | 0,29  |
|                        | дно         | 0,00–1,54   | 0,07    | 0,26  | 0,01–0,23   | 0,08    | 0,06  |
| Кремнекислота, мкМ     | поверхность | 2,24–66,5   | 7,46    | 10,8  | 1,39–138,4  | 8,42    | 22,44 |
|                        | дно         | 2,63–14,4   | 5,48    | 2,66  | 1,52–11,0   | 4,22    | 1,74  |
| Нитраты, мкМ           | поверхность | 0,00–233,5  | 8,8     | 38,7  | 1,01–352,0  | 17,7    | 67,1  |
|                        | дно         | 0,00–5,54   | 1,07    | 1,17  | 0,93–4,33   | 2,59    | 0,87  |
| Нитриты, мкМ           | поверхность | 0,05–3,70   | 0,33    | 0,62  | 0,03–3,41   | 0,25    | 0,64  |
|                        | дно         | 0,00–0,41   | 0,18    | 0,12  | 0,01–0,19   | 0,10    | 0,05  |
| Аммоний, мкМ           | поверхность | 0,06–82,9   | 5,69    | 15,7  | 0,04–15,6   | 1,94    | 2,89  |
|                        | дно         | 0,20–20,6   | 2,97    | 4,76  | 0,00–5,18   | 1,34    | 1,21  |
| Щелочность, мг-экв/кг  | поверхность | –           | –       | –     | 3,345–3,584 | 3,366   | 0,040 |
|                        | дно         | –           | –       | –     | 3,345–3,395 | 3,357   | 0,012 |

Таким образом, во всех сезонах основным источником фосфатов является пресноводный сток в Южной бухте, где их содержание в кутовой части в 5–10 раз больше (0,6–1,7 мкМ по сравнению с 0,1–0,01 мкМ в

зависимости от сезона), чем в остальной части бухты. Содержание фосфатов в приустьевой области реки Черной изменялось в течение года от 0,25 до 0,38 мкМ и было заметно ниже (в 3–10 раз), чем в Южной бухте.



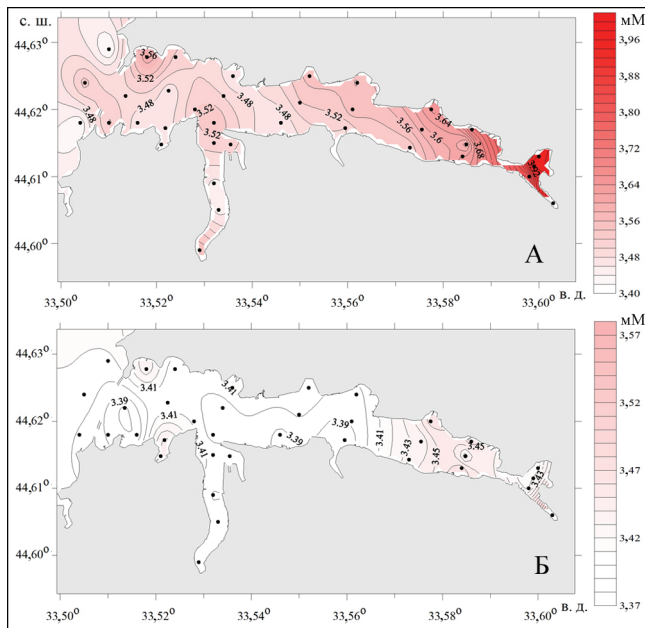


Рис. 2. Пространственное распределение щелочности (в мМ) в поверхностных (А) и придонных (Б) водах Севастопольской бухты в феврале 2022 г.

Fig. 2. Spatial distribution of alkalinity (in mM) in surface (A) and bottom (B) waters of the Sevastopol Bay in February 2022

В содержании кремнекислоты в поверхностных водах наблюдались те же тенденции – накопление в феврале (концентрации для большей части акватории на уровне 20 мкМ), затем уменьшение до 5–7 мкМ в апреле с минимумом их концентрации в сентябре (3–5 мкМ) и постепенное увеличение содержания в ноябре (в среднем 5–8 мкМ) (рис. 4). Вклад пресноводных источников кремнекислоты в бухте изменялся в зависимости от сезона: в феврале содержание кремнекислоты в кутовой части Южной бухты не отличалось от фонового, тогда как в приустьевом районе реки Черной концентрации были в 2–3 раза выше фоновых (50–60 мкМ). В апреле вклад стока, выходящего в устье Южной бухты, был преобладающим – максимальная концентрация наблюдалась в кутовой части Южной бухты (75 мкМ), а в приустьевой области реки Черной изменялась в диапазоне 20–50 мкМ. В сентябре и ноябре основным источником силикатов также был пресноводный сток в Южную бухту, там содержание кремнекислоты было примерно в 10 раз выше фонового и достигало 70 мкМ. В приустьевой части реки Черной их концентрация изменялась в пределах 10–13 мкМ, что было незначительно выше средней величины в бухте в данный период.

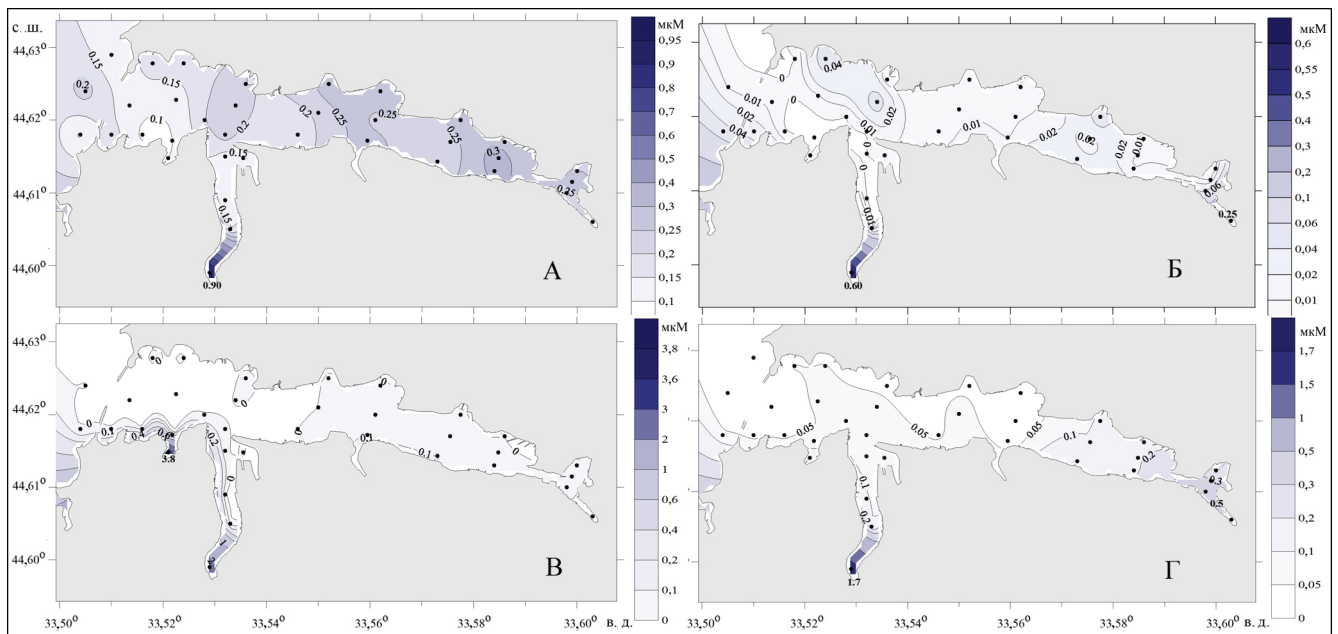


Рис. 3. Содержание фосфатов в поверхностных водах Севастопольской бухты в 2022 г.:

А – февраль; Б – апрель; В – сентябрь; Г – ноябрь

Fig. 3. Phosphate content in the surface waters of the Sevastopol Bay in 2022:

А – February; Б – April; В – September; Г – November

Тот же цикл накопления зимой, расходования весной, практического исчезновения в теплый период и постепенного увеличения содержания поздней осенью характерен и для нитратов (рис. 5).

В феврале их содержание на большей части акватории было в среднем около 10 мкМ, в апреле снижалось до 3–5 мкМ, достигая минимума в сентябре – 2–3 мкМ в центральной части бухты, и практически

нулевых концентраций (около 0,5 мкМ, при пределе обнаружения 0,36 мкМ) в районе выхода из бухты; к ноябрю наблюдалось постепенное возрастание концентраций (до 6 мкМ). Для нитратов их поступление со стоком реки Черной практически незаметно по сравнению с пресноводным источником, впадающим в кутовую часть Южной бухты. Там

содержание нитратов во все рассмотренные сезоны в 100 раз превышало фоновые (за выходом из бухты) и достигало 234–380 мкМ в различные сезоны. В устьевой части реки Черной концентрация нитратов зависела от сезона и изменялась, в среднем, от 7 до 50 мкМ с максимальными значениями в апреле, минимальными – в сентябре.

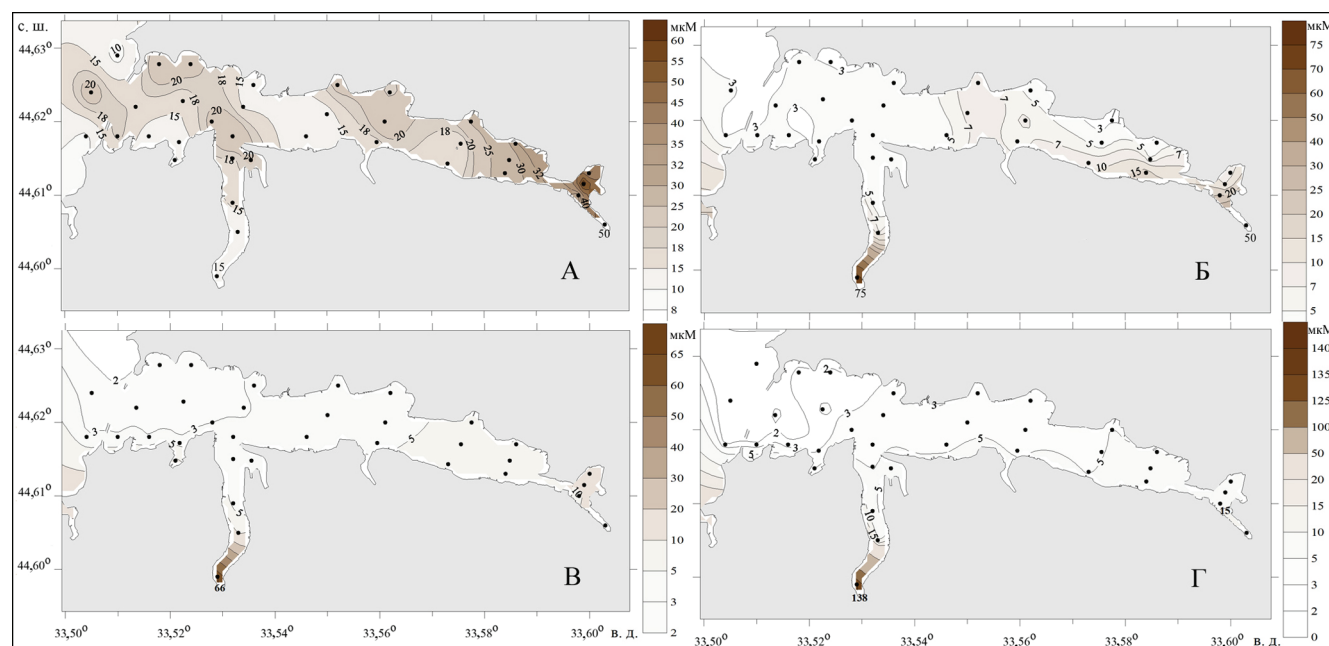


Рис. 4. Содержание кремниевой кислоты в поверхностных водах Севастопольской бухты в 2022 г.:  
А – февраль; Б – апрель; В – сентябрь; Г – ноябрь

Fig. 4. Silica acid content in the surface waters of the Sevastopol Bay in 2022:  
A – February; B – April; B – September; Г – November

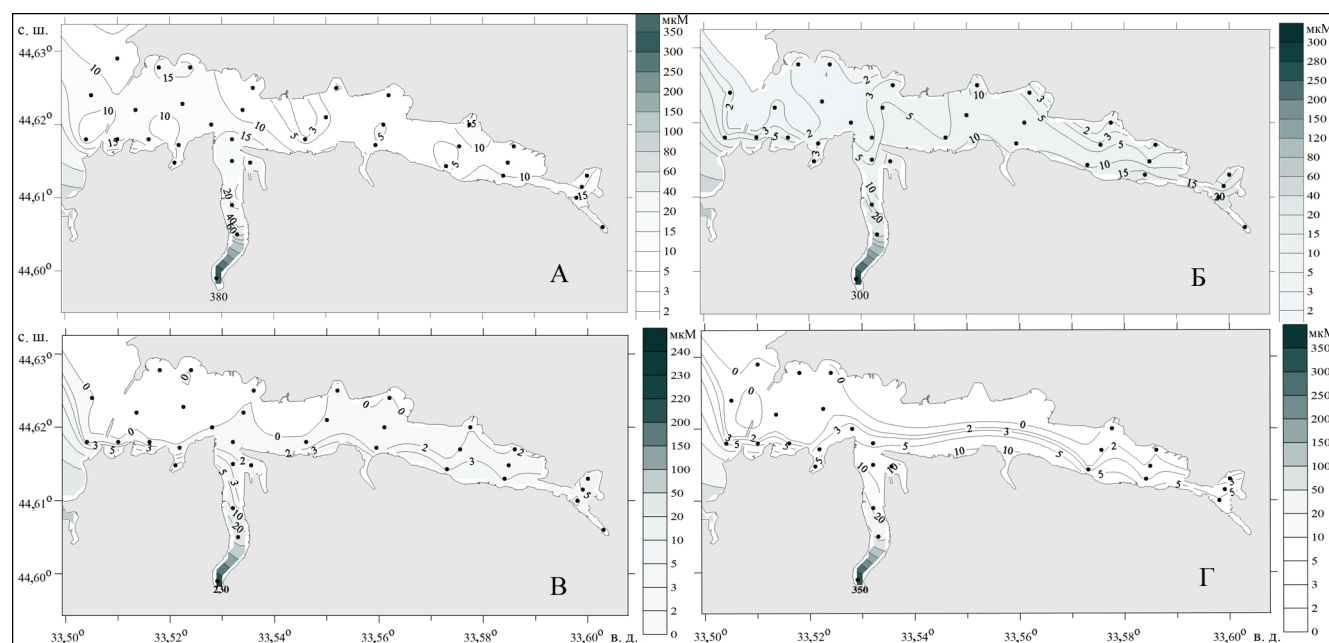


Рис. 5. Содержание нитратов в поверхностных водах Севастопольской бухты в 2022 г.:  
А – февраль; Б – апрель; В – сентябрь; Г – ноябрь

Fig. 5. Nitrate content in the surface waters of the Sevastopol Bay in 2022:  
A – February; Б – April; В – September; Г – November

Изменчивость концентрации ионов аммония в поверхностных водах Севастопольской бухты в наибольшей степени проявляется в зимний период, когда наблюдаются повышенные концентрации (в среднем 2,5–2,0 мкМ), и в теплый период (сентябрь), когда для большей части бухты отмечаются невысокие концентрации ионов аммония (около 0,9 мкМ) (рис. 6). Источником ионов аммония преимущественно является пресноводный сток бухты Южной, наблюдается та же закономерность, что и

в распределении нитратов – концентрации (за исключением зимнего периода) примерно в 20–40 раз превышают фоновые. В осенний период (сентябрь, ноябрь) кроме повышенных концентраций в кутовой части Южной бухты и приустьевом районе реки Черной, выделяется еще один район – Артбухты, где в сентябре был отмечен максимум концентрации 80 мкМ, а в ноябре она хоть и была несколько ниже (48 мкМ), но являлась максимальной для всей исследуемой акватории.

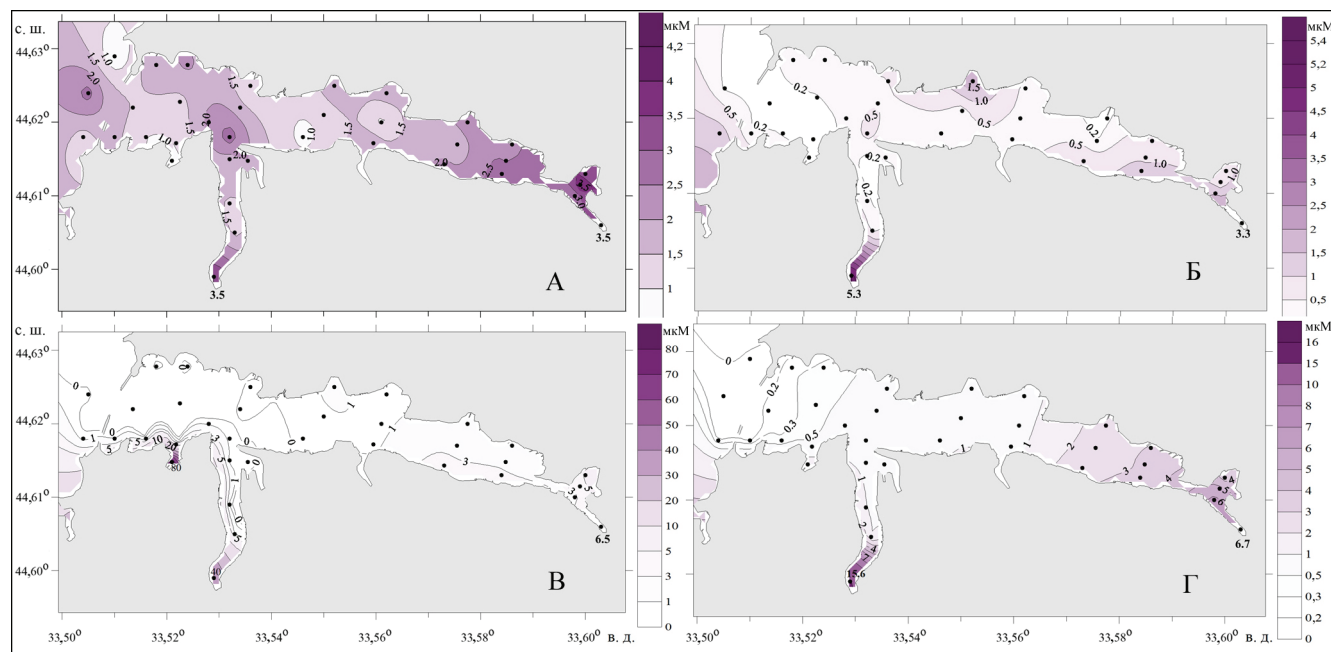


Рис. 6. Содержание аммония в поверхностных водах Севастопольской бухты в 2022 г.:

А – февраль; Б – апрель; В – сентябрь; Г – ноябрь

Fig. 6. Ammonium content in the surface waters of the Sevastopol Bay in 2022:

A – February; B – April; B – September; Г – November

По распределению биогенных элементов и их концентрациям в предустьевом районе реки Черной (до ст. 8 [Орехова и др., 2018]) в 2022 г. был оценен ее вклад в поступление биогенных элементов в акваторию бухты. С учетом среднесуточной величины расхода реки Черной – 56 млн м<sup>3</sup>/год [Орехова и др., 2018] поступление в 2022 г. минеральных форм азота (за исключением нитритов) составило 31 т/год, фосфатов – 4,6 т/год и кремниескислоты – 56 т/год. Эти величины сопоставимы с полученными ранее среднесуточными значениями [Орехова и др., 2018], но следует отметить увеличение поступления минеральных форм азота (ранее было 24,5 т/год). Таким образом, можно отметить увеличение вклада реки Черной в поступление неорганического азота в воды бухты.

Так как концентрация рассматриваемых биогенных элементов в устьевой части бухты Южной была

значительно выше фоновых, то необходимо оценить вклад и этого пресноводного стока. Однако нигде в литературных данных не встречается информация о величине стока данного источника, также в этих источниках он помечен как аварийный [Грузинов и др., 2019]. Тем не менее по нашим данным превышение концентрации всех биогенных элементов в поверхностном слое вод в данном районе по сравнению с остальной частью бухты наблюдается в течение всего года, что может указывать на постоянно действующий источник распресненных вод и загрязняющих веществ. К сожалению, количественно оценить поступление биогенных элементов с этим источником не представляется возможным.

Для доказательства поступления пресноводного стока в кутовую часть Южной бухты приводим рис. 7, на котором для двух сезонов представлено распределение в поверхностных водах солёности



и нитратов, содержание последних в Южной бухте постоянно превышает фоновые значения на два порядка. В апреле, когда следует ожидать максимального поступления пресных вод с выпавшими осадками, соленость в кутовой части не превышает 15‰. В сентябре объем пресного стока и распределение поверхностных вод гораздо меньше, тем не

менее соленость заметно повышается по мере удаления от кутовой части.

В качественном соответствии с объемом поступивших пресных вод находится концентрация в поверхностных водах нитратов. В апреле концентрация нитратов в кутовой части превышает 350 мкМ, в сентябре она несколько меньше, около 200 мкМ.

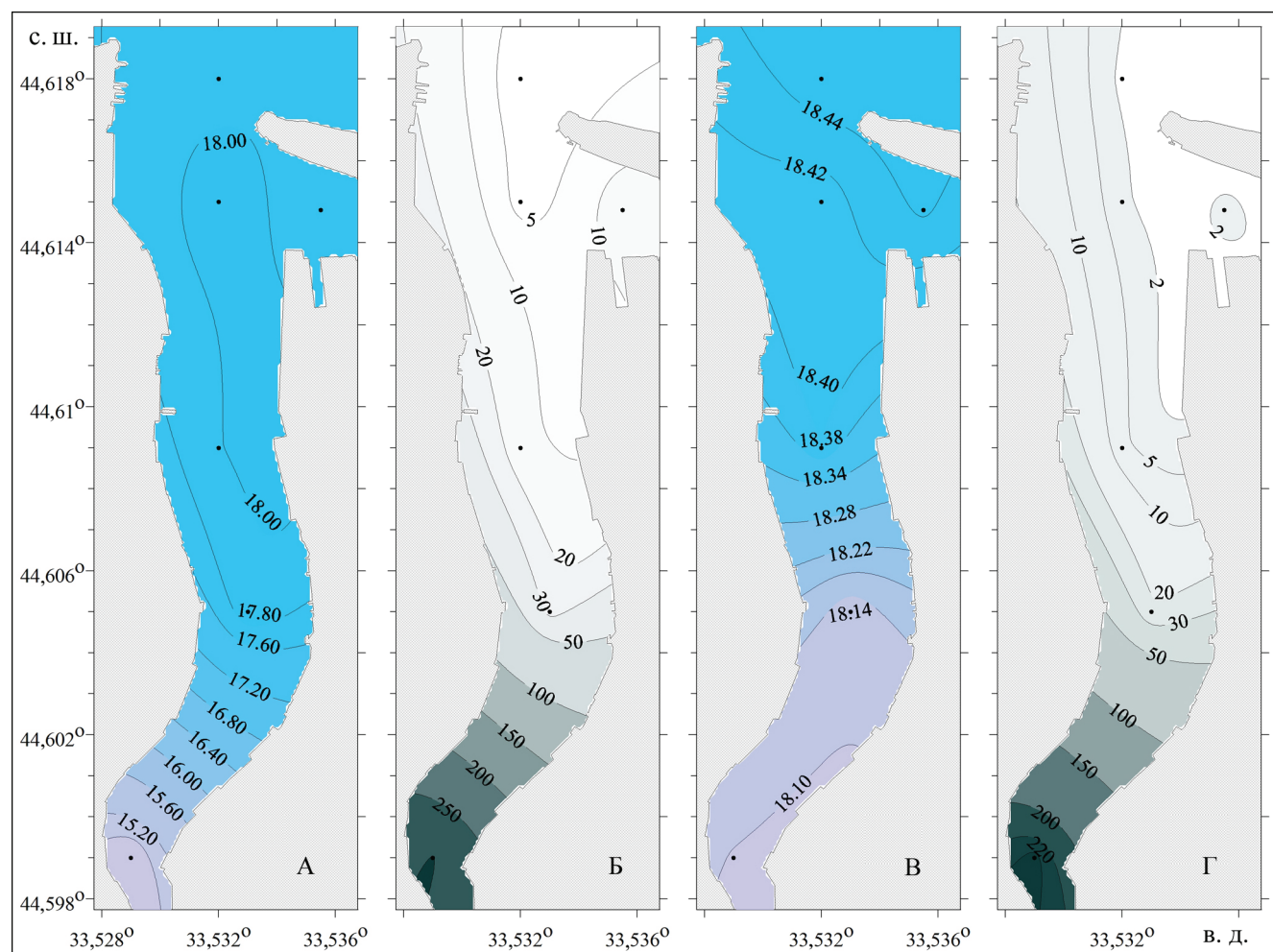


Рис. 7. Пространственное распределение солености (в ‰) (А, В) и нитратов (в мкМ) (Б, Г) в поверхностных водах Южной бухты в апреле (А, Б) и сентябре (В, Г) 2022 г.

Fig. 7. Spatial distribution of salinity (in ‰) (A, B) and nitrate (in  $\mu\text{M}$ ) (Б, Г) in surface waters of the Yuzhnaya Bay in April (A, B) and September (B, Г) 2022

Еще одним индикатором экологического состояния морской среды является содержание кислорода как компонента, обеспечивающего нормальное функционирование морских экосистем и дыхание биологических организмов. Кроме того, наличие кислорода и его концентрация определяют окислительно-восстановительные условия системы, возможность развития анаксийных условий и появления сероводорода, являющегося каталитическим ядом.

Однако, если опасность экологическому состоянию вод, возникающая вследствие высокого содер-

жания биогенных элементов, следует искать в их поверхностных распределениях, которые обеспечивают временами 200% насыщение кислородом поверхностных вод [Иванов и др., 2006], то для выявления особенностей режима кислорода наиболее информативно его придонное распределение. Это обусловлено так же и тем, что донные отложения являются дополнительным источником органического вещества и биогенных элементов, что приводит к более интенсивному потреблению кислорода, а значит, и его меньшей концентрации в придонном слое вод.

Так, в период исследований в поверхностных водах бухты в зимний период концентрация кислорода приближалась к полному насыщению (в среднем 98% нас.), к весеннему периоду наблюдалось пересыщение вод кислородом (105% нас.), в осенний период наблюдалось снижение концентрации кислорода (93 и 90% нас. в сентябре и ноябре соответственно). Такое изменение концентрации кислорода соответствует осредненным данным многолетних исследований Севастопольской бухты [Свищев и др., 2011].

Концентрация кислорода в придонном слое вод, как и следовало ожидать, была ниже, чем в поверхностном (во все сезоны менее 86–97% нас.). В сезонном ходе изменения концентрации прослеживалась та же тенденция, что для поверхностного слоя, – максимум (97% нас.) в апреле, минимум в сентябре – ноябре. При этом минимум концентрации кислорода (44% нас.), близкой к состоянию гипоксии [Diaz, 2001; Zhang et al., 2010], был зафиксирован на ст. 8 в сентябре. Данная ситуация носит сезонный характер – ежегодно в теплый период года (август – сентябрь) в районе ст. 8 (см. рис. 1) наблюдается крайне низкая степень насыщения, часто менее 10%. В некоторые годы она падала до 0%, в этих случаях содержание сероводорода фиксировалось органолептически (по запаху).

В частности, в 2004 г. насыщение придонных вод в этом районе приближалось к 0%, в 2014 и 2015 гг. составляло 6 и 10% соответственно, в 2021 г. – около 15%, что соответствует состоянию аноксии / гипоксии. При этом в остальных районах бухты, включая ближайшие станции, насыщение придонных вод кислородом достигало 85–90%. Причины дефицита кислорода связаны с существованием искусственно созданной выемки под плавучим доком, расположенным возле ст. 8, и более подробно рассмотрены в [Кондратьев, Видничук, 2020]. Это углубление служит своеобразным «депо» для отмершего планктона, который ранее образовался в приустьевом районе реки Черной за счет дополнительного поступления биогенных элементов с речным стоком.

Таким образом, можно предположить, что сток реки Черной, обогащенный биогенными элементами, способствует продуцированию дополнительного количества органического вещества, его переносу и накоплению в искусственно созданном углублении под плавучим доком, что в совокупности приводит к развитию дефицита кислорода и гипоксических (содержание кислорода менее 30% нас.), а иногда

и аноксических (отсутствие кислорода) условий в придонных водах этого углубления. При негативном стечении обстоятельств – снижении динамики вод, увеличении температуры вод – есть опасность подъема этих вод на поверхность. Тогда экологии бухты (количеству и разнообразию фитопланктона, а далее по трофической цепи рыбным ресурсам и бентосу) будет нанесен непоправимый ущерб.

## ВЫВОДЫ

На примере четырех сезонных съемок Севастопольской бухты в 2022 г. обсуждены основные экологические проблемы состояния ее вод.

Подтверждено основополагающее влияние на гидрохимический состав вод бухты стока реки Черной, который служит одним из основных источников биогенных элементов.

Отмечено значительное влияние пресноводного стока в кутовой части Южной бухты на гидрохимические характеристики данного района, а при ветрах южных румбов возможно распространение этих вод к центральной части бухты, что негативно отразится на состоянии ее экосистемы.

Поступление пресноводного стока в куттовую часть Южной бухты требует дополнительных работ по выявлению как основного источника, так и состава его вод.

В 2022 г. зафиксировано появление дополнительного источника ионов аммония в куттовой части Артиллерийской бухты, его концентрация в сентябре в 80 раз превышала фоновую. Так как аммоний является продуктом окисления органического вещества, то его появление может указывать на преобладание деструкционных процессов, что негативно отражается на условиях существования биологических организмов и экологическом состоянии вод в целом.

В искусственно созданном углублении под плавучим доком (ст. 8) в теплое время года регулярно фиксируется дефицит кислорода, а в некоторых случаях и образование сероводорода.

Таким образом, в настоящее время в Севастопольской бухте существует как минимум два постоянно действующих источника биогенных элементов и еще один носит сезонный характер. Созданное искусственное углубление в районе погружного дока может быть потенциальным источником сероводородного заражения. Все это негативно отражается на условиях существования биологических организмов, экологическом состоянии всей экосистемы и рекреационном потенциале бухты.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках темы госзадания FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багаев А.В., Никишин В.В., Рауэн Т.В., Вержевская Л.В., Щербаченко С.В. Локальные изменения физико-биологических параметров поверхностных вод Севастопольской бухты под влиянием ливневого стока // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38. № 2. С. 165–184. DOI: 10.22449/0233-7584-2022-2-165-184.
- Грузинов В.М., Дьяков Н.Н., Мезенцева И.В., Мальченко Ю.А., Жохова Н.В., Коршенко А.Н. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района // Океанология. 2019. Т. 59. № 4. С. 579–590. DOI: 10.31857/S0030-1574594579-590.
- Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н., Романов А.С., Игнатъева О.Г. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. Севастополь: МГИ НАНУ, 2006. 90 с.
- Кондратьев С.И., Видничук А.В. Особенности вертикального распределения кислорода и сероводорода в Черном море по экспедиционным данным Морского гидрофизического института в 1995–2015 годах // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34. № 5. С. 422–433. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-5-422-433.
- Кондратьев С.И., Видничук А.В. Локальная сезонная гипоксия и образование сероводорода в придонных водах Севастопольской бухты в 2009–2019 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 107–212. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-2-107-121.
- Методы гидрохимических исследований океана. М.: Наука, 1978. 271 с.
- Овсяный Е.И., Артеменко В.М., Романов А.С. и др. Сток реки Черной, как фактор формирования водно-солевого режима и экологического состояния Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 57–65.
- Орехова Н.А., Вареник А.В. Современный гидрохимический режим Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34. № 2. С. 134–146. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-2-134-146.
- Орехова Н.А., Коновалов С.К., Медведев Е.В. Особенности регионального баланса неорганического углерода морских экосистем в условиях антропогенной нагрузки // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 3. С. 248–260. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-3-248-260.
- Орехова Н.А., Медведев Е.В., Овсяный Е.И. Влияние вод реки Черной на гидрохимический режим Севастопольской бухты (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 84–91. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-84-91.
- Рябцев Ю.Н., Вержевская Л.В., Рауэн Т.В., Цыганова М.В., Никишин В.В., Багаев А.В. Поиск оптимального расположения проектируемых выпусков городской канализации в Севастопольской бухте с помощью численного моделирования и геоинформационного анализа // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 111–128. DOI: 10.22449/2413-5577-2021-1-111-128.
- Свищев С.В., Кондратьев С.И., Коновалов С.К. Закономерности сезонных изменений содержания и распределения кислорода в водах Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 4. С. 64–78.
- Совга Е.Е., Мезенцева И.В., Хмара Т.В. Моделирование сезонной изменчивости гидродинамического режима Севастопольской бухты и оценки самоочистительной способности ее экосистемы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15. № 2. С. 110–123. DOI: 10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt.
- Совга Е.Е., Хмара Т.В. Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 1. С. 31–40. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-1-31-40.
- Современные методы гидрохимических исследований океана / под ред. О.К. Бордовского, А.М. Черняковой. М.: ИО АН СССР, 1992. 201 с.
- Diaz R.J. Overview of hypoxia around the World, *J. Environ. Qual.*, 2001, vol. 30, p. 275–281.
- Zhang J., Gilbert D., Gooday A.J. et al. Natural and human hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development, *Biogeosciences*, 2010, vol. 7, p. 1443–1467.

Поступила в редакцию 27.04.2023

После доработки 15.06.2023

Принята к публикации 27.07.2023



# POTENTIAL THREATS TO THE ECOLOGICAL STATE OF WATER IN THE SEVASTOPOL BAY

S.I. Kondratev<sup>1</sup>, N.A. Orekhova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Federal Research Center "Marine Hydrophysical Institute of RAS" (Sevastopol), Department of Marine Biogeochemistry

<sup>1</sup> Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Chemistry; e-mail: skondratt@mail.ru

<sup>2</sup> Head of the Laboratory for Monitoring and Research of Greenhouse Gases and Oxygen in the Marine Environment, Ph.D. in Geography; e-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ru

The purpose of the work is to discuss the main environmental problems of the state of waters in the Sevastopol Bay and to identify the causes affecting their quality. Four seasonal surveys of the Sevastopol Bay water area in 2022 confirmed the prime impact of the Black River runoff, a main source of nutrients, on the hydrochemical composition of the bay waters.

At the same time, it is noted that the hydrochemical parameters of the South Bay waters are predominantly affected by freshwater runoff in the estuarine part of the area rather than by the Black River water. It is assumed that the runoff is permanent, and not emergency, as previously thought. With the winds of the southern directions, the spread of the South Bay water to the central part of the Sevastopol Bay is possible, thus affecting the state of its ecosystem.

In summer an additional source of ammonium ions was recorded in the estuarine part of the Artillery Bay, next to which the Crystal city beach is located, with concentrations 80 times higher than the background. Since ammonium is a product of organic matter oxidation, its appearance may indicate the predominance of destructive processes, which affect living conditions of biological organisms and, in general, the ecological state of waters.

In the warm season a constant deficiency of oxygen was observed in the bottom waters of an artificial depression under the floating dock, which in some cases leads to the formation of hydrogen sulfide.

All detected threats affect the ecological state of entire ecosystem of the bay, the living conditions of biological organisms and the recreational potential of the bay.

**Keywords:** hydrochemical composition of water, ecology, hydrogen sulfide contamination, field data

**Acknowledgments.** The work was carried out under the state task theme FNNN-2021-0005 "Complex interdisciplinary studies of oceanologic processes which determine functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black Sea and the Sea of Azov".

## REFERENCES

- Bagaev A.V., Nikishin V.V., Rauen T.V., Verzhevskaja L.V., Scherbachenko S.V. Local changes of physical and biological parameters of the Sevastopol Bay surface waters under the influence of rain drainage, *Physical Oceanography*, 2022, vol. 29, no. 2, p. 152–171.
- Diaz R.J. Overview of hypoxia around the World, *J. Environ. Qual.*, 2001, vol. 30, p. 275–281.
- Gruzinov V.M., Dyakov N.N., Mezenceva I.V., Malchenko Y.A., Zhohova N.V., Korshenko A.N. Sources of coastal water pollution near Sevastopol, *Okeanology*, 2019, vol. 59, no. 4, p. 523–532.
- Ivanov V.A. i dr. *Gidrologo-gidrohimičeskij režim Sevastopol'skoj buhty i ego izmenenija pod vozdejstviem klimatičeskikh i antropogennyh faktorov* [Hydrological and hydrochemical regime of the Sevastopol Bay and its changes under the influence of climatic and anthropogenic factors], Preprint, NAN Ukrainy, MGI, Sevastopol, 2006, 90 p. (In Russian)
- Kondratev S.I., Vidnichuk A.V. Lokal'naja sezonnaja gipoksija i obrazovanie serovodoroda v pridonnyh vodah Sevastopol'skoj buhty v 2009–2019 godah [Local seasonal hypoxia and hydrogen sulfide formation in the bottom waters of the Sevastopol Bay in 2009–2019], *Ekologičeskaja bezopasnost' pribrežnoj i shel'fovoj zon morja*, 2020, no. 2, p. 107–212, doi:10.22449/2413-5577-2020-2-107-121. (In Russian)
- Kondratev S.I., Vidnichuk A.V. Features of the oxygen and sulfide vertical distribution in the Black Sea based on the expedition data obtained by Marine Hydrophysical Institute in 1995–2015, *Physical Oceanography*, 2018, vol. 25, no. 5, p. 390–400.
- Metody gidrokhimičeskikh issledovanij okeana* [Methods of hydrochemical research of the Ocean], O.K. Bordovsky (ed.), Moscow, Nauka Publ., 1978, 271 p. (In Russian)
- Orekhova N.A., Konovalov S.K., Medvedev E.V. Features of inorganic carbon regional balance in marine ecosystems under anthropogenic pressure, *Physical Oceanography*, 2019, vol. 26, no. 3, p. 225–235.
- Orekhova N.A., Varenik A.V. Current hydrochemical regime of the Sevastopol Bay, *Physical Oceanography*, 2018, vol. 25, no. 2, p. 124–135.
- Orekhova N.A., Medvedev E.V., Ovsyany E.I. Vlijanie vod reki Chernoj na gidrohimičeskij režim Sevastopol'skoj buhty (Chernoe more) [Influence of the River Chernaya water on hydrochemical regime of the Sevastopol Bay (the Black Sea)], *Ekologičeskaja bezopasnost' pribrežnoj i shel'fovoj zon morja*, 2018, no. 3, p. 84–91, DOI: 10.22449/2413-5577-2018-3-84-91. (In Russian)
- Ovsyanyj E.I., Artemenko V.M., Romanov A.S. i dr. Stok reki Chernoj, kak faktor formirovanija vodno-solevogo režima i ekologičeskogo sostojanija Sevastopol'skoj buhty [Runoff of the Chernaya River as a factor of for-

- mation of the water-salt regime and the ecological state of the Sevastopol Bay], *Ekologicheskaja bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa*, Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2007, no. 15, p. 57–65. (In Russian)
- Ryabtsev Ju.N., Verzhetskaja L.V., Rauen T.V., Tsyganova M.V., Nikishin V.V., Bagaev A.V. Poisk optimal'nogo raspolozhenija proektiruemyh vypuskov gorodskoj kanalizacii v Sevastopol'skoj buhte s pomoshh'ju chislennogo modelirovanija i geoinformacionnogo analiza [Search for the optimal configuration of projected municipal sewerage outfalls in the Sevastopol Bay using computational modeling and geoinformation analysis], *Ekologicheskaja bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon morja*, 2021, no. 1, p. 111–128, DOI:10.22449/2413-5577-2021-1-111-1284. (In Russian)
- Sovga E.E., Khmara T.V. Influence of the Chernaya River runoff during high and low water on the ecological state of the apex of the Sevastopol Bay water area, *Physical Oceanography*, 2020, vol. 27, no. 1, p. 28–36.
- Sovga E.E., Mezentseva I.V., Khmara T.V. Modelirovanie sezonnoj izmenchivosti gidrodinamicheskogo rezhima Sevastopol'skoj buhty i ocenki samoochistitel'noj sposobnosti ee ekosistemy [Simulation of seasonal hydrodynamic regime in the Sevastopol Bay and of assessment of the self-purification capacity of its ecosystem], *Fundamental'naja i prikladnaja gidrofizika*, 2022, vol. 15, no. 2, p. 110–123, DOI: 10.48612/fpg/92ge-ahz6-n2pt. (In Russian)
- Sovremennye metody gidrohimicheskikh issledovanij okeana* [Modern methods of hydrochemical studies of the ocean], O.K. Bordovsky, A.M. Chernyakova (eds.), Moscow, Shirshov Institute of Oceanology of the USSR Academy of Sciences Publ., 1992, 201 p. (In Russian)
- Svishchev S.V., Kondrat'ev S.I., Konovalov S.K. Regularities of seasonal variations in the content and distribution of oxygen in waters of the Sevastopol Bay, *Physical Oceanography*, 2011, no. 4, p. 280–293.
- Zhang J., Gilbert D., Gooday A.J., et al. Natural and human hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development, *Biogeosciences*, 2010, vol. 7, p. 1443–1467.

Received 27.04.2023

Revised 15.06.2023

Accepted 27.07.2023



## ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ПУСТЫРЕЙ ГОРОДА АСТРАХАНИ

А.С. Тихонов<sup>1</sup>, Т.И. Харитонов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,  
кафедра физической географии и ландшафтоведения*

<sup>1</sup> *Аспирант; e-mail: alexandrtihonov055@gmail.com*

<sup>2</sup> *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: kharito2010@gmail.com*

В статье приводится мультикритериальная оценка ландшафтно-экологического потенциала пустырей города Астрахани. Под пустырями понимаются незастроенные и не используемые территории, не отнесенные действующим генпланом к зеленым зонам города. Целью исследования является выявление наиболее ценных неиспользуемых территорий, сохранение и благоустройство которых поможет в перспективе улучшить качество и привлекательность городской среды, наименее ценные при этом могут быть рекомендованы для использования в городском хозяйстве. В работе оцениваются четыре ландшафтные функции, отвечающие главным проблемам города: 1) функция регулирования стока оценивается на основе морфометрического анализа каналов стока и полевых данных об эрозии и заболачивании; 2) климаторегулирующая функция оценивается исходя из расчета охлаждающей способности пустыря с помощью модели InVest; 3) рекреационная функция оценивается на основе полевых и дистанционных данных о состоянии растительного покрова пустыря и запроса на рекреационные зоны из расчета пешеходного пути до ближайшего парка; 4) функция регулирования загрязнения воздуха оценивается на основе данных об экологически обусловленной детской заболеваемости и плотности зеленых насаждений в районах города. Исходя из интегральной оценки, предложен приоритетный тип использования пустырей. Ландшафтно-экологический потенциал пустырей Астрахани заметно отличается в разных районах. Высокие оценки получили пустыри северо-восточной окраины города, расположенной в пределах пониженной части дельты Волги, наименьшие – пустыри небольших размеров в центре города и в промышленной зоне на востоке. В итоге к благоустройству было рекомендовано 2570 га территории, а к застройке – 327,9 га.

**Ключевые слова:** городские ландшафты, ландшафтно-экологические функции, дистанционное зондирование, рекреационный потенциал, городской остров тепла, регулирование стока, регулирование загрязнения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.2

### ВВЕДЕНИЕ

Трансформация способов промышленного производства и внедрение информационных технологий необратимо меняют социальную роль городов и размывают специализацию, поэтому их экономическое благосостояние все больше определяется степенью развития досуговой и культурной инфраструктуры и комфортностью городской среды.

Если рассматривать ландшафтно-географическую составляющую комфортной среды, то она включает безопасность от стихийных природных процессов, благоприятный климат, качественные воздух, воду и почвы, пешеходную близость парков и других открытых мест отдыха, эстетическую и экологическую привлекательность городских кварталов, которая повышается за счет озеленения. Все перечисленные характеристики зависят от структуры и функционирования городских ландшафтов, их способности при определенной мозаике застро-

енных и незастроенных территорий поддерживать средостабилизирующие природные процессы и противостоять деструктивным. Вопрос формирования комфортной городской среды сводится во многом к нахождению оптимальной структуры застройки и сохранению незастроенными наиболее ценных ландшафтов, выполняющих спектр поддерживающих, регулирующих и культурных функций [DeGroot et al., 2002]. К настоящему моменту нарабатана обширная методическая база по исследованию ландшафтных сопряжений на урбанизированной территории, оценке экосистемных услуг и функций городских зеленых пространств, поиску их оптимальных размеров и сочетаний [Климанова и др., 2020; Hamstead et al., 2016; Forman, 2014], но эти разработки крайне редко принимаются во внимание в российской практике городского проектирования.

При сохранении границ городов перспективным земельным ресурсом для нового строительства

в городской черте являются незастроенные участки разных размеров и разного функционального назначения, не имеющие статуса зеленых насаждений согласно генплану [Forman, 2014]. С одной стороны, эти участки являются неформально существующими или перспективными элементами экологического каркаса, с другой – потенциально являются криминально и экологически опасными местами, на которых образуются стихийные свалки, растет численность нежелательных синантропных организмов. Очевидно, что для городского планирования необходима инвентаризация всех незастроенных земель и их комплексная ландшафтно-экологическая оценка, которая позволит выделить территории, способные регулировать природные процессы и создавать комфортную природную среду, и территории менее ценные, но пригодные для застройки.

Сравнительная оценка ландшафтно-экологического потенциала незастроенных городских земель попала в фокус ландшафтной экологии не так давно, хотя публикаций с примерами социально-экологической и экономической оценки и благоустройства отдельных пустырей достаточно много [Evans, 2007; Heckert, Mennis, 2012]. В последнее десятилетие стремительное развитие методического инструментария оценки экосистемных услуг городских территорий позволило проводить сравнение десятков и даже сотен неиспользуемых земельных участков [McPhearson et al., 2013] и давать рекомендации для их приоритетной застройки и благоустройства [Schetke et al., 2012]. В своем большинстве сравнительная оценка ведется путем анализа и классификации космических снимков высокого разрешения и интерпретации свойств и площадей выделяемых классов ландшафтного покрова – много-, средне- и малоэтажной застройки, заасфальтированной поверхности, открытой почвы, травяной, кустарниковой и древесной растительности, воды. С помощью индексов, разработанных для природных условий изучаемой территории, классы ландшафтного покрова переводятся в их способность выполнять требуемые в городе функции: снижать летние температуры, осаждавать пыль, улавливать газы, фильтровать поверхностный сток, поддерживать биологическое разнообразие и др.

Ценность выполняемой функции повышается с ростом на нее социального и экологического спроса. Так, рекреационная функция пустырей становится крайне важной в плотно застроенных кварталах, мало обеспеченных зеленой инфраструктурой, а значение стокорегулирующей функции одного и того же типа древесных насаждений растет с крутизной эрозионно-опасных склонов [Харитонов и др., 2018].

Понятие «пустырь» объединяет в себе различные типы в настоящее время неиспользуемых зе-

мель: заброшенные территории с некоторой долей искусственного покрытия и, возможно, загрязнения от предыдущей деятельности; лоскуты нарушенных природных ландшафтов вокруг новостроек; земли с определенными природными ограничениями для строительства; удаленные от коммунальной инфраструктуры участки, не нашедшие себе застройщика. Когда мы говорим о городских пустырях и неиспользуемых землях, мы должны представлять причины, по которым они исключены из городских потоков, так как от этого во многом зависит их ландшафтно-экологический потенциал. Способность территории выполнять регулирующие и культурные функции связана, как было показано, с мозаикой ландшафтного покрова. В городе ландшафтный покров – это довольно гибкая, быстро меняющаяся характеристика, поэтому оценка ландшафтно-экологического потенциала пустырей должна опираться на различные сценарии их возможного использования и, соответственно, изменения ландшафтной мозаики.

Цель данного исследования – оценка ландшафтно-экологического потенциала пустырей города Астрахани и составление рекомендаций по их дальнейшему использованию. Алгоритм оценки следующий: 1) выявление экологических и социальных проблем города, которые могут быть решены ландшафтно-планировочными методами; 2) определение набора ландшафтных функций, которые в связи с выявленными проблемами должны быть оценены; 3) инвентаризация городских незастроенных земель, не имеющих статуса зеленых зон и не предназначенных к застройке в ближайшем будущем; 4) сбор полевых, фоновых и дистанционных материалов; 5) мультикритериальная оценка и разработка рекомендаций для рационального встраивания неиспользуемых земель в структуру города – застройка устойчивых и экологически безопасных территорий, обладающих низкой совокупной экологической ценностью; сохранение и благоустройство участков, обладающих максимальным потенциалом для выполнения регулирующих и рекреационных функций; санация малоценных, загрязненных и экологически нарушенных территорий.

**Объект исследования.** Астрахань, единственный в России крупный город пустынной зоны, расположен в 100 км от Каспийского побережья, имеет протяженность вдоль основного русла Волги 30 км. Город построен на дельтовой равнине, на абсолютных высотах от –27 до –15 м и геоморфологически связан с Прикаспийской низменностью. Старая часть города находится на левобережье Волги, в центральной части дельты, для которой характерен рисунок из плоских участков аллювиальных равнин, возвышенных бэровских бугров и межбугровых понижений,

пересеченных многочисленными водотоками. К северу присутствие бэровских бугров в дельте снижается, снижается и площадь относительно дренированных территорий, пригодных для застройки, а в ландшафтной структуре увеличивается доля проток, озер и ериков. Правобережная часть Астрахани относится к ильменно-бугровой равнине, хорошо распознаваемой по регулярному рисунку вытянутых с запада на восток бэровских бугров и межбугровых понижений, занятых ильменями и ериками, соединенных протоками с руслом Волги. Северо-западные кварталы города заходят в местность приволжских песков [Занозин, Худаева, 2016]. Сильно минерализованные грунтовые воды находятся на глубине 1,5–2 м, их уровень зависит от гидрологического режима Волги и колебаний уровня Каспийского моря. Во время половодий нередко происходит смыкание поверхностных и грунтовых вод и подтопление пониженных районов города. Нивелирование рельефа, застройка и асфальтирование поверхности, утечка воды из подземной канализации приводят к дополнительному заболачиванию и подтоплению территории [Никулин, 2009]. Регулирование поверхностного стока является важнейшей проблемой города.

Климат Астрахани – умеренно-континентальный. Средняя температура июля 25,6°C, а температура самого холодного месяца, февраля, –3,7°C. При среднегодовой норме осадков 233 мм дефицит атмосферного увлажнения составляет более 500 мм. Данные глобального мониторинга городского климата [Earth Engine Apps, 2022] свидетельствуют об отсутствии острова тепла в дневное время и о незначительном превышении температур над пригородом ночью, что является типичной ситуацией для городов аридной зоны. Но, учитывая общий зональный уровень теплового дискомфорта Астрахани и увеличение частоты температурных экстремумов выше +35°C в летний сезон, регулирование климата является серьезной задачей городского планирования.

Климатические и гидрогеологические условия накладывают ограничение на развитие древесной растительности и определяют формирование на территории города преимущественно аридных, галоморфных и гидроморфных природных комплексов. Зеленые территории представлены преимущественно пойменными влажными и сезонно затопляемыми лугами и ивово-тополевыми лесами на островах и низких поймах.

Физико-географические и климатические условия обуславливают частую повторяемость приземных инверсий, что становится причиной высокого потенциала загрязнения воздушной среды в городе, причем не только за счет аккумуляции загрязнителей от местных источников, но и за счет трансграничного переноса [Коломин и др., 2015].

Анализ природных условий территории обусловил приоритетность следующих ландшафтных функций при оценке ландшафтно-экологического потенциала пустырей Астрахани: 1) стокорегулирующей; 2) климаторегулирующей; 3) рекреационной и 4) функции регулирования загрязнения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Инвентаризация незастроенных земель Астрахани.** Пустыри были выделены и оцифрованы по снимкам высокого разрешения «Яндекс» и Bing. Участок относился к неиспользуемым при отсутствии застройки или объектов транспортной, рекреационной и иной инфраструктуры, ожидаемой согласно назначению данной территории по карте функционального зонирования МО «Город Астрахань», а также не имел статуса зеленой зоны города [Генеральный план..., 2020]. Полевое обследование отобранных участков включало описание рельефа, поверхностных отложений, растительности, экзогенных процессов, современного использования и замусоренности территории, доли и характера искусственного покрытия, ландшафтного соседства.

**Данные многоспектральной космической съемки.** На основе разнотемпературных (февраль–октябрь 2020 г.) снимков Sentinel-2 в программе QGIS 3.8 проведена классификация ландшафтного покрова. Выделено семь классов: водные объекты, солончаки, древесная растительность, травяная растительность, застроенные поверхности, открытый грунт, включая пустынную разреженную растительность, и сезонно затопляемые территории. Верификация классификации по 150 случайным точкам показала итоговую точность в 74,37%. Ошибки связаны со сходными отражающими свойствами бликующих крыш и солончаков, а также мелколиственных пойменных лесов и тростниковых зарослей.

**Морфометрический анализ рельефа.** Цифровая модель поверхности SRTM [Earth Explorer, 2022] с пространственным разрешением в 1 с дуги эллипсоида, что соответствует на широте Астрахани ячейке приблизительно 21,5 ´ 31 м, была скорректирована по топографической карте ГНЦ масштабом 1 : 25 000 таким образом, чтобы убрать «выбросы» рельефа, связанные с застройкой и древесными насаждениями. На основе скорректированной модели рельефа в программе SagaGIS смоделированы линии каналов поверхностного стока.

**Моделирование охлаждающей способности пустырей.** Для расчета способности пустырей снижать температуру в окрестности 500 м использовалась модель InVest 3.9.0. Urban Cooling [InVest..., 2021]. Модель рассчитывает охлаждающий эффект для каждого участка, опираясь на данные о затененности, альбедо и испаряемости земной по-

верхности [Bartesaghi et al., 2018]. Теневой эффект в городе дают (с разным весовым коэффициентом) деревья и здания, доля их площади на территории каждого пустыря определена по созданной карте классов ландшафтного покрова. Средние значения альбедо для каждого класса ландшафтного покрова вычислены для самого жаркого месяца по снимку Landsat-8 по принятой методике [Liang, 2010]. Индекс испаряемости рассчитан на основании региональных значений испаряемости [Касимов и др., 2016], скорректированных с учетом рельефа и испаряющей способности разных классов ландшафтного покрова.

Моделирование проведено для трех состояний исследуемых участков – современного, застроенного и озелененного. В оценке использовалась величина разности охлаждающей способности пустыря в современном и в застроенном состоянии, так как озеленение территории является крайне желательным, но трудно достижимым в природных условиях Астрахани.

**Расчет пешеходной доступности зеленых зон города.** На основе векторных данных уличной сети Астрахани [OpenStreetMap, 2022] в программе GRASS GIS 7.4.5 были рассчитаны расстояния от жилых кварталов до ближайших парков и скверов. Расстояния были переведены во время пешеходного пути, и для всего города построена карта с изохронами пешеходной доступности. Полученные данные в последующем анализе рассматриваются не как объективная необходимость именно прохождения данного пути, а как индикатор обеспеченности зелеными насаждениями жилых кварталов города.

**Статистические данные.** В качестве косвенного показателя уровня загрязнения окружающей среды использованы статистические данные по детской заболеваемости. Показатели здоровья горожан широко применяются при оценке загрязнения атмосферы и почвы городов [Крутских, Белашев, 2020], для более точной привязки к району использованы данные только по детскому населению. Данные, предоставленные ГБУЗ АО «Медицинский информационно-аналитический центр» Министерства здравоохранения Астраханской области, охватывают случаи онкологических заболеваний и астмы среди детского населения в возрасте от 0 до 14 лет за 2011–2019 гг. по девяти поликлиникам, обслуживающим четыре района города – Кировский, Ленинский, Советский и Трусовский. В последующем анализе использована средняя заболеваемость по району.

**Мультикритериальная оценка.** Оценка городов по сумме взвешенных нормализованных индикаторов успешно используется в социально-экономической географии [Землянский и др., 2020],

сходная методология применима и для показателей природной среды. Для измерения каждой выбранной функции определен набор индикаторов, которые оценены количественно или качественно, полученные оценки экспертным методом переведены в 10-балльную шкалу. По каждой функции проведено суммирование баллов, набранных пустырями по соответствующим индикаторам, итоговая сумма нормализована по максимально возможной сумме баллов. Таким образом, оценка каждой функции варьирует в интервале от 0 до 1. При анализе и картографировании ландшафтно-экологического потенциала пустырей использована следующая шкала: нормализованная сумма баллов от 0,81 до 1 – очень высокий потенциал; от 0,61 до 0,8 – высокий; от 0,41 до 0,6 – средний; менее 0,4 – низкий.

**Оценка функции регулирования стока** складывается из двух индикаторов – положения относительно каналов поверхностного стока, рассчитанных по цифровой модели рельефа, и развития экзогенных процессов в пределах пустыря, зафиксированных при полевом обследовании (табл. 1).

**Оценка функции регулирования климата** проводилась по одному индикатору – разнице в способности пустыря снижать температуру при его современном состоянии и при застройке. Разница вычислялась в градусах Цельсия для каждого пиксела и усреднялась на площадь пустыря. Для учета размеров пустырей и, следовательно, величины их влияния на климат города, были введены весовые коэффициенты, равные логарифму от площади пустыря. Оценочная шкала далее строилась как линейная, где минимальной разнице в температуре соответствовал 1 балл, а максимальной – 10 баллов.

**Оценка рекреационной функции** выполнялась по двум индикаторам – обеспеченности соседних с пустырем территорий объектами зеленой инфраструктуры, оцениваемой по времени их пешеходной доступности; и современного состояния растительного покрова в пределах самого пустыря – суммарной доли площади древесной и травяной растительности и степени их нарушенности по данным полевого обследования. Чем дальше от существующих парков расположен пустырь, тем выше спрос на новые зеленые территории и тем выше оценивается его потенциал для выполнения рекреационной функции, также потенциал повышается за счет хорошего состояния существующей растительности (см. табл. 1).

**Оценка функции регулирования загрязнения** основана на двух индикаторах – среднему по району уровню экологически обусловленной детской заболеваемости (онкология и заболевания дыхательных путей) и средней по району площади зеленых насаждений, приходящейся на одного человека. Шкала индикаторов построена по принципу востребованности



ванности зеленых насаждений: чем выше уровень детской заболеваемости и чем ниже норма озеленения, тем выше потенциал пустырей снижать загрязнение в случае их включения в экологический каркас города (см. табл. 1). Так как мы оперируем

данными по четырем районам, то нормирование по заболеваемости проведено от 0 до максимального в городе уровня, а нормирование по норме озеленения – от минимального в городе до рекомендованного для аридных зон значения в 21 м<sup>2</sup>/чел.

Таблица 1

## Шкалы индикаторов

| Балл | Индикаторы стокорегулирующей функции                                           |                                       | Индикаторы рекреационной функции                       |                                                       | Индикаторы функции регулирования загрязнения |                                                 |
|------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|      | Положение относительно каналов стока                                           | Экзогенные процессы                   | Пешая доступность объектов зеленой инфраструктуры, мин | Площадь пустыря, покрытая здоровой растительностью, % | Детская заболеваемость, чел./1000 детей      | Норма озеленения в районе, м <sup>2</sup> /чел. |
| 10   | Несколько каналов начинаются или заканчиваются на пустыре                      | Длительное затопление и заболачивание | >55                                                    | >90                                                   | 36–40                                        | 0,4–2,5                                         |
| 9    | Один канал начинается или заканчивается на пустыре                             |                                       | 50–55                                                  | 80–90                                                 | 32–36                                        | 2,5–4,6                                         |
| 8    | Через пустырь проходит приток реки первого порядка                             | Кратковременное затопление            | 45–50                                                  | 70–80                                                 | 28–32                                        | 4,6–6,7                                         |
| 7    | Через пустырь проходит приток реки второго порядка                             |                                       | 40–45                                                  | 60–70                                                 | 24–28                                        | 6,7–8,8                                         |
| 6    | Через пустырь проходит приток реки третьего порядка                            | Эрозионные борозды                    | 35–40                                                  | 50–60                                                 | 20–24                                        | 8,8–10,9                                        |
| 5    | Через пустырь проходит приток реки четвертого и большего порядка               |                                       | 30–35                                                  | 40–50                                                 | 16–20                                        | 10,9–13,0                                       |
| 4    | Пустырь находится в пределах склона притока реки первого порядка               | Эрозионные микроборозды               | 25–30                                                  | 30–40                                                 | 12–16                                        | 13,0–15,1                                       |
| 3    | Пустырь находится в пределах склона притока реки второго порядка               |                                       | 20–25                                                  | 20–30                                                 | 8–12                                         | 15,1–17,2                                       |
| 2    | Пустырь находится в пределах склона притока реки третьего порядка              |                                       | 15–20                                                  | 10–20                                                 | 4–8                                          | 17,2–19,3                                       |
| 1    | Пустырь находится в пределах склона притока реки четвертого и большего порядка |                                       | 10–15                                                  | 1–10                                                  | <4                                           | 19,3–21                                         |
| 0    | Пустырь находится вдали от каналов стока                                       |                                       | <10                                                    | 0                                                     | 0                                            | >21                                             |

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования было выделено 53 пустыря размером от 0,8 до 1038,7 га (рис. 1). В городе различаются три типа пустырей. Самая большая группа по численности и по общей площади рас-

положена на окраинах города и никогда не застраивалась. Эти пустыри возникли как результат изменения границ города. Среди них можно выделить три крупных кластера. Северо-восточный кластер (пустыри 21–31) расположен в пределах северной, наиболее пониженной и обводненной, местности

дельты Волги. Согласно генеральному плану, большая часть неосвоенных земель здесь предназначена под многофункциональное использование, включающее жилую застройку и рекреационные зоны. Под промышленное использование отведено 157 га, или 9%, северо-восточного кластера и дополнительно 240 га, или 15%, кластера – под многофункциональную с участием промышленных, инфраструктурных и транспортных объектов. Юго-западный

(пустыри 32–38) и северо-западный (44–45, 48, 50, 52–53) кластеры находятся в пределах Западного ильменно-бугрового ландшафта и административно относятся к Трусовскому району. Земли юго-западного кластера главным образом отведены под жилую застройку, в северо-западном кластере 24% территории отведено под промышленную застройку, остальные пустыри – под жилую застройку, рекреацию и сельское хозяйство.

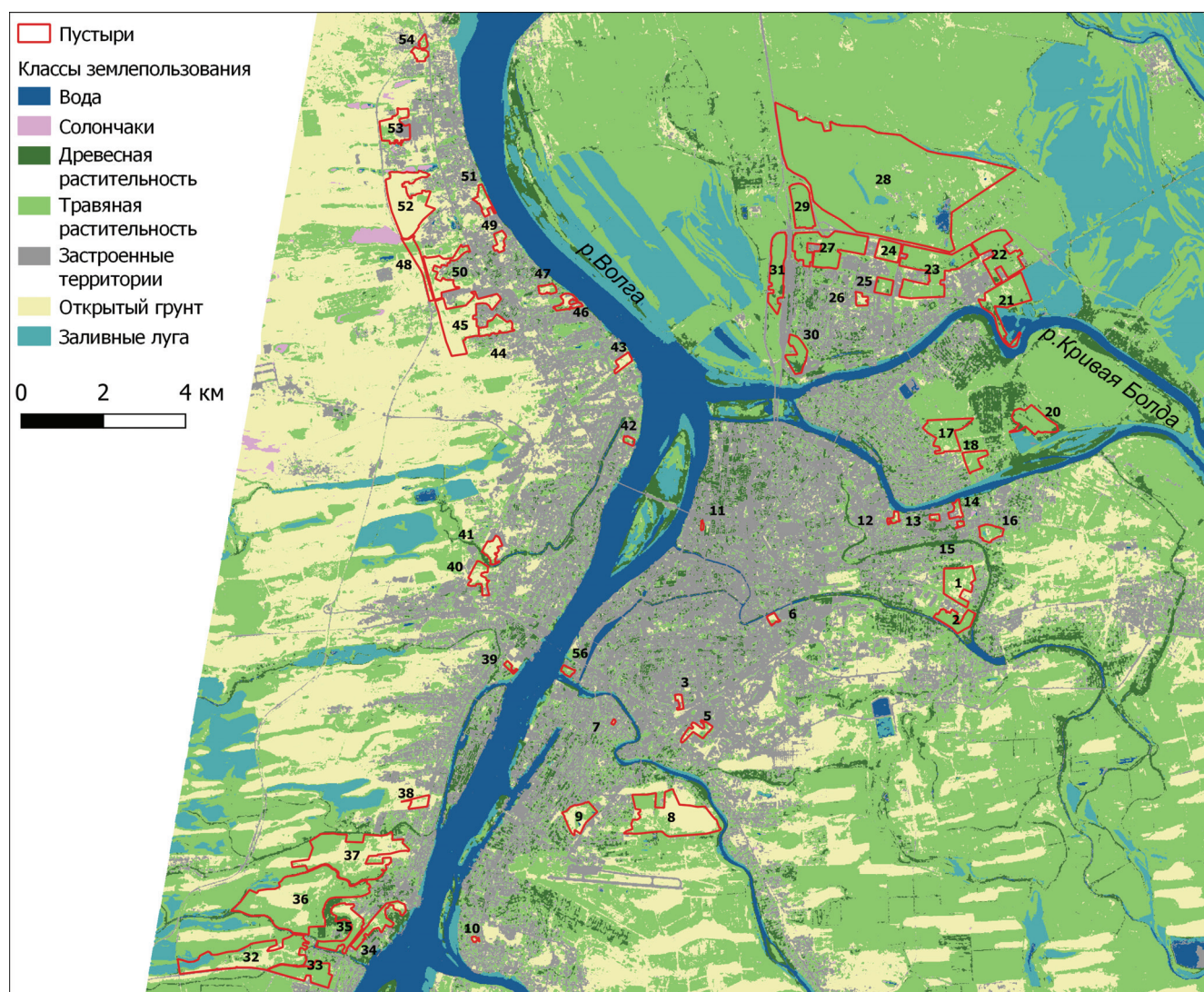


Рис. 1. Исследованные пустыри г. Астрахани

Fig. 1. The studied sites of vacant lands in the city of Astrakhan

Вторая группа пустырей образовалась в промышленных зонах (пустыри 3–5, 12–15, 39, 42, 43, 49, 51), часто на месте снесенных построек. На востоке города они образуют целый кластер. Большая часть этих пустырей, согласно генплану, сохраняют свою принадлежность промышленной зоне, 11 га (11% общей территории) отведены под малоэтажную жилую застройку и рекреацию.

Третья группа пустырей, самая малочисленная и меньшая по площади, представляет собой вкрапления небольших незастроенных участков в плотную жилую застройку (пустыри 6, 7, 11, 46, 47, 56), все они имеют статус жилых зон и только пустырь 47 площадью 8,4 га предназначен под рекреационные цели.

Рассмотрим более подробно результаты оценки на примере двух пустырей, получивших крайне вы-

сокие (пустырь 24) и крайне низкие (пустырь 51) баллы по всем показателям. Эти пустыри сравнимы по площади и согласно генплану одинаково предназначены для промышленного строительства. Пустырь 24 расположен в северной части дельты Волги на низкой обводненной аллювиальной равнине, занятой галофитной пустынно-степной растительностью на гидроморфных засоленных почвах, и в настоящее время преобразован слабо. Пустырь 51 находится на придолинном слабопокатом склоне в пределах ильменно-бугрового ландшафта. Территория пустыря перекрыта техногенными отложениями и частично застроена, но при этом занята относительно густым закустаренным лугом.

#### **Оценка функции регулирования стока.**

Оценки стокорегулирующей функции пустырей

разделились относительно четко: низкие оценки получили пустыри на правом берегу Волги, где в рельефе преобладают замкнутые понижения – ильмени, и высокие – на левобережье, в пределах дельтового ландшафта (рис. 2А). Максимальные оценки получили пустыри северо-западного кластера, где каналы стока проходят в относительно глубоких понижениях и нарушение дренажа приводит к усилению процессов заболачивания и засоления почв, которые уже наблюдаются в этой местности. Надо отметить, что наиболее ценные пустыри в этом кластере запланированы под рекреацию, сельское хозяйство и малоэтажную застройку, что не должно сильно нарушить их стокорегулирующие функции.

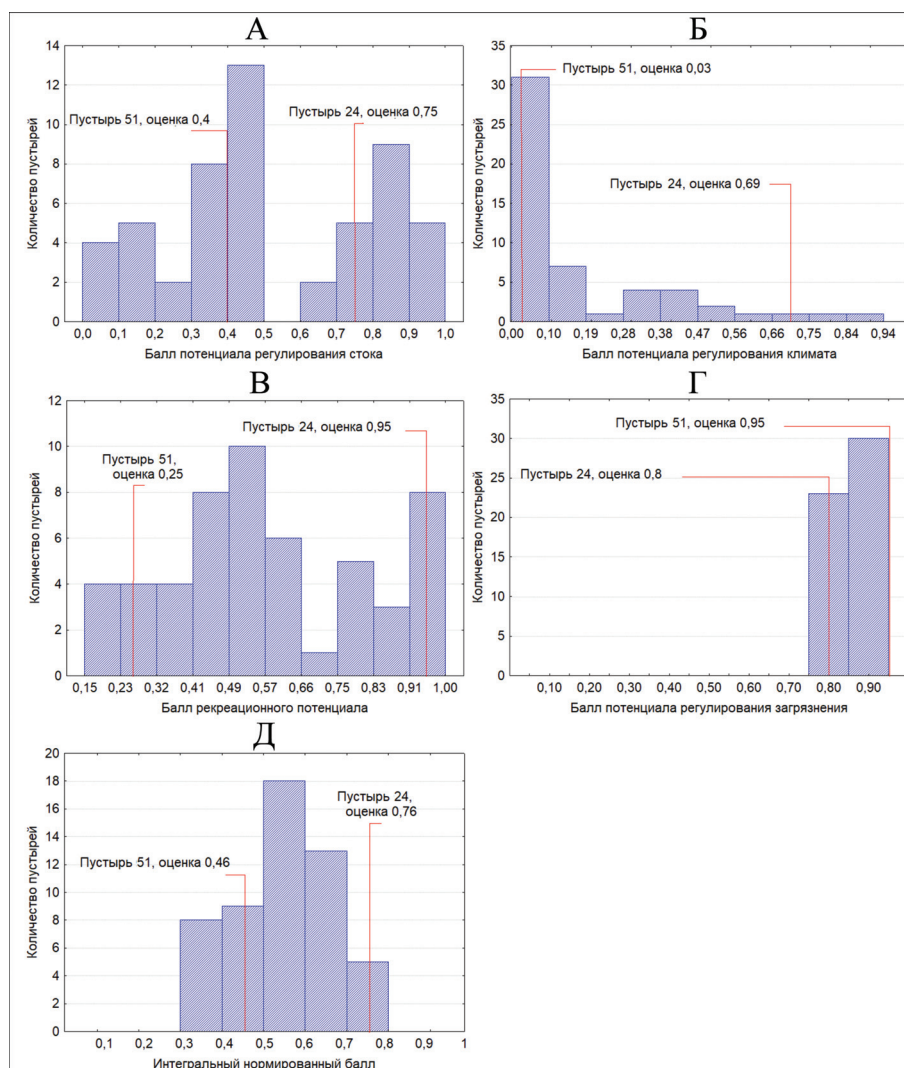


Рис. 2. Распределение оценок ландшафтно-экологических функций и интегрального балла по пустырям: А – стокорегулирующей функции; Б – функции регулирования климата; В – рекреационной функции; Г – функции регулирования загрязнения; Д – интегральная оценка

Fig. 2. Distribution of assessments of landscape and ecological functions and of the integral score for vacant land sites: А – runoff retention function; Б – climate regulation function; В – recreational function; Г – pollution retention function; Д – integral assessment



Наименьший вклад в регулирование стока вносят пустыри небольших размеров в центральной части города, где многие речные протоки убраны в подземные коммуникации и не опознаются на местности.

Через всю территорию пустыря 24 протекает два канала стока высокого порядка, дренирующие его болотистую местность. Стокорегулирующая функция пустыря 51 оценивается низким баллом, так как, несмотря на придолинное положение, каналы стока здесь отсутствуют.

**Оценка функции регулирования климата.** Способность пустыря влиять на климат прилегающей территории, кроме прочих факторов, зависит от его площади, поэтому в группу с самым низким потенциалом регулирования климата попали пустыри площадью менее 20 га. Крупные пустыри, оказавшиеся в этой группе, характеризуются низкой долей деревьев при большой доле пустынной растительности и открытого грунта. В целом в условиях засушливого климата и скудной растительности без искусственного озеленения пустыри Астрахани плохо справляются с регулированием климата (см. рис. 2Б). Главным кондиционером города является северо-восточный кластер, в котором за счет высокой обводненности ландшафтов большая доля солнечной энергии тратится не на нагрев атмосферы, а на испарение. Изменение уровня компенсации городского острова тепла при застройке также максимальное в северо-восточном кластере, к которому относится пустырь 24. Пустынная и сухостепная растительность пустыря 51 не способна ни затенить земную поверхность, ни испарить большой объем влаги, поэтому низкий уровень компенсации острова тепла практически не изменится при застройке.

**Оценка рекреационной функции.** Рекреационный потенциал пустырей оказался достаточно высоким для всего города (см. рис. 2В), что связано в первую очередь с малой обеспеченностью города зеленой инфраструктурой. Расчет продолжительности пешего пути до ближайшего парка показал, что 51,4% территории города находится на расстоянии более 30 минут пути. Снижение рекреационной функции происходит из-за современного состояния почвенно-растительного покрова на территории пустыря: участки с пустынной растительностью и засоленными почвами получали более низкий балл.

Пустырь 24 сохранил свою естественную пустынную и солончаковую растительность, пустырь 51 покрыт рудеральной травянистой растительностью, представленной верблюжьей колючкой (*Alhagi pseudalhagai*) и парнолистником обыкновенным (*Zygophyllum fabago*). Лишь на небольшом участке склона долины Волги увеличивается видовое богатство и появляется древесная растительность.

### **Оценка функции регулирования загрязнения.**

Оценка данной функции проводилась не индивидуально для каждого пустыря, а по административным районам, что связано с районной статистикой детской заболеваемости, взятой в качестве индикатора экологической обстановки. В связи с этим вариация оценок по пустырям незначительная (см. рис. 2Г). Максимальный уровень заболеваемости детей наблюдается в Трусовском районе – в среднем 38,6 случаев на 1000 детей в год. Трусовский район одновременно характеризуется низким уровнем озеленения (2,9 м<sup>2</sup> зеленых насаждений на человека), поэтому все пустыри правобережья Волги получили высокие оценки. В Ленинском районе наблюдается минимальный уровень заболеваемости – 26,9 случаев на 1000 детей, поэтому, несмотря на сходную плотность зеленых насаждений, пустыри северо-восточного кластера оцениваются несколько ниже. Самые высокие оценки получили пустыри Советского района, где средняя плотность зеленых насаждений составляет 0,8 м<sup>2</sup> на человека при относительно высоком уровне детской заболеваемости – 34,5 случаев на 1000 детей.

**Интегральная ценность пустырей.** Исследование показало, что вариация интегральных оценок ниже вариации оценок отдельных функций (см. рис. 2Д, рис. 3). Нередко пустыри, интегрально оцененные низко, выполняют одну из функций на очень высоком уровне и наоборот. Так, например, положение пустыря 51 в районе с высоким уровнем детской заболеваемости и недостатком зеленых насаждений определило его высокий потенциал регулирования атмосферного загрязнения.

Наиболее низкие оценки получили пустыри небольшой площади, расположенные в центральной части города. При этом площадь пустыря не является статистически достоверным фактором, определяющим его ценность. Большой вес в интегральной оценке имеет современное состояние почвенно-растительного покрова пустыря, поэтому территории, присоединенные к городу недавно и наименее нарушенные, в целом получили более высокие оценки.

Проведенная оценка носит прагматический характер, и ее результаты понятны застройщикам и городским властям. Сохранение ландшафтных функций наиболее ценных пустырей работает на улучшение санитарно-экологической ситуации в городе и сберегает ресурсы на борьбу с негативными природными процессами при их застройке. Одновременно в оценке участвуют факторы, которые влияют также и на поддержание экологических функций, менее понятных застройщикам, таких, как сохранение биологического разнообразия и мест обитания редких видов флоры и фауны. Ландшафтное положение Астрахани в дельте



р. Волги ограничивает площадь территорий с относительно благоприятными для строительства гидрогеологическими условиями. Рост города становится возможным, главным образом, за счет дренажа болот, изменения сети речных протоков и других гидромелиоративных мероприятий, которые приводят к уничтожению ценных водно-болотных угодий. Оценка стокорегулирующей функции построена таким образом, что пойменное положение и наличие болотных массивов значительно повышают ценность пустыря, а сохранение пустыря для регулирования стока служит

одновременно поддержанию биологического разнообразия. В условиях аридного климата особую экологическую ценность приобретают лесные массивы, являющиеся местообитаниями редких видов. Наличие древесных насаждений заложено в оценку климаторегулирующей и рекреационной функций. Таким образом, можно утверждать, что проведенное исследование дает всестороннюю оценку ландшафтно-экологического потенциала пустырей и может служить основанием для разработки рекомендаций по их дальнейшему использованию (табл. 2).

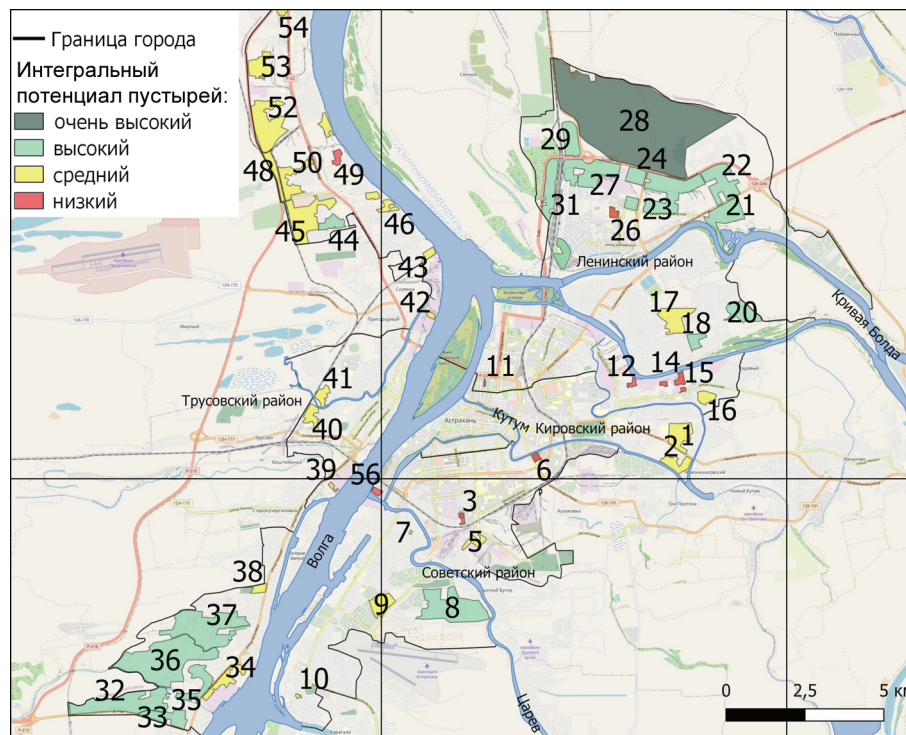


Рис. 3. Интегральный ландшафтно-экологический потенциал пустырей г. Астрахани

Fig. 3. Integral landscape and ecological potential of vacant lands in the city of Astrakhan

Неиспользуемые территории с высоким ландшафтно-экологическим потенциалом занимают в городе 1,5 тыс. га. Для этих пустырей рекомендована разреженная жилая застройка с сохранением массивов зеленых насаждений, которые выполняют отдельные ландшафтные функции на высоком уровне.

Территории со средним ландшафтно-экологическим потенциалом общей площадью 705 га в целом могут быть использованы для городского строительства, если в итоговую оценку не входят высокие и очень высокие баллы по отдельным функциям. В противном случае территория должна использоваться с максимальным сохранением зеленых насаждений.

Пустыри низкой ценности занимают 38 га городских земель и расположены преимущественно

в центральной, наиболее плотно застроенной части Астрахани. Их современное состояние не обеспечивает выполнение регулирующих и рекреационных функций, но при этом два из них находятся в загрязненных районах и имеют высокий потенциал регулирования загрязнения при их озеленении и благоустройстве.

Так как ресурсы для благоустройства могут быть ограничены, пустыри с высоким ландшафтно-экологическим потенциалом были разделены под приоритетное и неприоритетное благоустройство. Менее ценные с точки зрения выполнения ландшафтно-экологических функций пустыри рекомендованы под рекреационное благоустройство. Часть пустырей выполняют свои функции в своем современном состоянии, для них рекомендовано сохранение без специального благоустройства. Для

городской застройки пригодно 11% наименее ценных пустующих земель.

Полученные оценки и рекомендации по использованию пустырей нередко входят в противоречие с принятым генеральным планом города. Так, пустырь 24, приводимый нами в качестве примера на всех этапах оценки, по совокупной ценности занимает второе место в списке, но генпланом предназначен для промышленной застройки.

Исследование проведено в среднем масштабе и является апробацией комплексных, преимущественно дистанционных методов оценки экологических функций ландшафтов городов. Для разработки конкретных предложений на локальном уровне необходимы дополнительные данные, а также проведение инженерно-экологических, инженерно-геологических и иных изысканий.

Таблица 2

**Распределение пустырей по рекомендуемому землепользованию  
в пределах ландшафтов Астрахани**

| Ландшафтный район                  | Общая площадь пустырей, га | Площадь территории приоритетного благоустройства, га | Площадь территории неприоритетного благоустройства, га | Площадь рекреационного благоустройства, га | Сохраняемая площадь, га | Площадь, рекомендуемая к застройке, га |
|------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------|
| Северная местность дельты Волги    | 710,3                      | 645,3                                                | 0                                                      | 57,3                                       | 0                       | 7,7                                    |
| Центральная местность дельты Волги | 347,9                      | 157,7                                                | 55,4                                                   | 30,1                                       | 18,5                    | 86,2                                   |
| Ильменно-бугровый ландшафт         | 1210,0                     | 727,8                                                | 292,1                                                  | 0                                          | 43,5                    | 137,6                                  |
| Волжско-приергенинский             | 14,2                       | 0                                                    | 0                                                      | 0                                          | 0                       | 14,2                                   |

*Примечание.* Составлено на основании проведенной оценки.

### ВЫВОДЫ

Оценка ландшафтно-экологического потенциала пустырей Астрахани выявила более 245 га городских земель, которые можно застроить, не причинив значимого вреда городу, и 64 га земель, которые выполняют средостабилизирующие функции в своем современном состоянии. При этом более 1,9 тыс. га нуждаются в благоустройстве для их включения в экологический каркас города.

Оценка функций регулирования климата, стока, загрязнения и рекреационного потенциала пустырей Астрахани во многом зависит от современного состояния почвенно-растительного покрова как самих пустырей, так и окружающей территории, поэтому пустыри, получившие интегрально высокую оценку по четырем выбранным функциям, обладают высоким потенциалом реализации и других экологических функций – поддержания биологического разнообразия, депонирования углерода, поддержания почвенного плодородия и др.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность канд. геогр. наук А.В. Синцову, канд. геогр. наук В.В. Занозину за ценные консультации, канд. биол. наук Е.Г. Русаковой за помощь в определении растений и ГБУЗ АО «Медицинский информационно-аналитический центр» за предоставленные данные.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Занозин В.В., Худаева Д.Н. Морфологическая структура зональных ландшафтов Астраханской области // *Экология России: на пути к инновациям*. 2016. № 13. С. 12–16.
- Землянский Д.Ю., Махрова А.Г., Медведникова Д.М. Методические подходы к составлению комплексных индексов социально-экономического развития городов // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2020. № 4. С. 21–29.
- Касимов Н.С., Касатенкова М.С., Ткаченко А.Н., Лычагин М.Ю., Крооненберг С.Б. Геохимия лагунно-маршевых и дельтовых ландшафтов Прикаспия. М.: Лига-вент, 2016. 244 с.
- Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Зеленая инфраструктура города: оценка состояния и проектирование развития // *Товарищество научных изданий КМК*, 2020. 324 с.

- Коломин В.В., Рыбкин В.С., Чуйков Ю.С., Ярославцев А.С. Особенности состояния воздушной среды г. Астрахани // *Естественные науки*. 2015. № 2(51). С. 28–36.
- Крутских Н.В., Белаишев Б.З. База данных вызовов скорой медицинской помощи как информационная основа геоэкологических исследований урбанизированных территорий // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2020. № 5. С. 52–62.
- Никулина Е.М. Ландшафтно-географический подход как основа экологического каркаса городов (на примере г. Астрахани) // *Естественные и технические науки*. 2009. № 6(44). С. 441–446.
- Харитонов Т.И., Мерекалова К.А., Мусеев А.И., Баталова В.А., Воловинский И.В., Ильинова Н.В., Подгорный О.М., Слатецкий К.Е., Соколов А.И., Черкасова В.А. Оценка ландшафтных функций урбогеосистем г. Тюмени // *Материалы XIII Международной ландшафтной конференции, посвященной столетию со дня рождения Ф.Н. Милькова: в 2 т. / под ред. В.Б. Михно*. М.: Истоки, 2004. С. 275–277.
- Bartasaghi C., Osmond P., Peters A. Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources, *Solar Energy*, 2018, vol. 166 (February), p. 486–508.
- De Groot R.S., Wilson M.A., Boumans R.M.J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services, *Ecological economics*, 2002, vol. 41(3), p. 393–408.
- Evans J.P. Wildlife corridors: An urban political ecology, *Local Environment*, 2007, vol. 12(2), p. 129–152.
- Forman R.T.T. *Urban ecology: science of cities*. Cambridge University Press, 2014. 464 с.
- Hamstead Z.A., Kremer P., Larondelle N., McPhearson T., Haase D. Classification of the heterogeneous structure of urban landscapes (STURLA) as an indicator of landscape function applied to surface temperature in New York City, *Ecological Indicators*, 2016, vol. 70, p. 574–585.
- Heckert M., Mennis J. The Economic Impact of Greening Urban Vacant Land: A Spatial Difference-In-Differences Analysis, *Environment and Planning A: Economy and space*, 2012, vol. 44, is. 12, p. 3010–3027.
- Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2000, vol. 76(2), p. 213–238.
- McPhearson T., Kremer P., Hamstead Z.A. Mapping ecosystem services in New York City: Applying a social-ecological approach in urban vacant land, *Ecosystem Services*, 2013, vol. 5, p. 11–26.
- Schetke S., Haase D., Kötter T. Towards sustainable settlement growth: A new multi-criteria assessment for implementing environmental targets into strategic urban planning, *Environmental Impact Assessment Review*, 2012, vol. 32, p. 195–210.
- Электронные ресурсы**
- Генеральный план города Астрахани. URL: <http://astrgorod.ru/node/3927> (дата обращения 15.07.2022).
- Earth Engine Apps. URL: <https://yceo.users.earthengine.app/view/uhimap> (дата обращения 15.07.2022).
- Earth Explorers. USGS. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 15.07.2022).
- InVEST User Guide. URL: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html> (дата обращения 20.10.2021).
- OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения 15.07.2022).

Поступила в редакцию 19.11.2022

После доработки 16.04.2023

Принята к публикации 27.07.2023

## LANDSCAPE AND ECOLOGICAL POTENTIAL OF VACANT LANDS IN THE CITY OF ASTRAKHAN

A.S. Tikhonov<sup>1</sup>, T.I. Kharitonova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

<sup>1</sup> Ph.D. student; e-mail: alexandrtikhonov055@gmail.com

<sup>2</sup> Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: kharito2010@gmail.com

The article provides a multicriterial assessment of urban vacant lands in the city of Astrakhan. Urban vacant lands are defined as undeveloped and unused sites, not attributed to green zones in the city plan. The purpose of the assessment is to recognize the most valuable vacant sites. Their conservation and rehabilitation could enhance the quality and attractiveness of urban environment, while less valuable sites could be recommended for urban development. The work evaluates four landscape functions that correspond to the main problems of the city: 1) runoff regulation function is assessed by the means of morphometric analysis of flow channels and field data on erosion and water logging; 2) climate regulation function is assessed using InVEST urban cooling model; 3) recreational function is evaluated by field and remote sensing data about the current state of vegetation on the vacant sites and by the demand of recreational zones estimated by walking time to the nearest park; 4) air pollution mitigation function is evaluated by the rate of environment child diseases and the density of green spaces in the city districts. Integral assessment of vacant sites helps to provide recommendations on their preferable use. Landscape and ecological potential of vacant lands varies significantly between different



parts of the city. Vacant sites of the northeastern outskirts of the city, located within the lower part of the Volga delta, received the highest values, while the small sites in the city center and the industrial zone in the eastern outskirts received the lowest values. As a result, 2570 ha of vacant lands were recommended for greening and rehabilitation, and 327,9 ha for construction.

**Keywords:** urban landscapes, landscape and ecological functions, remote sensing, recreational opportunities, urban heat island, run-off regulation, pollution regulation

**Acknowledgments.** The authors express their gratitude to Dr. A.V. Sintsov and Dr. V.V. Zanozin for the valuable consultations, to Dr. E.G. Rusakova for her assistance in plant classification and to the Medical information and analytic center (State Budgetary Healthcare Institution of Astrakhan Oblast) for the provided data.

## REFERENCES

- Bartasaghi C., Osmond P., Peters A. Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources, *Solar Energy*, 2018, vol. 166(February), p. 486–508.
- De Groot R.S., Wilson M.A., Boumans R.M.J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services, *Ecological economics*, 2002, vol. 41(3), p. 393–408.
- Evans J.P. Wildlife corridors: An urban political ecology, *Local Environment*, 2007, vol. 12(2), p. 129–152.
- Forman R.T.T. *Urban ecology: science of cities*, Cambridge University Press, 2014, 464 p.
- Hamstead Z.A., Kremer P., Larondelle N., McPhearson T., Haase D. Classification of the heterogeneous structure of urban landscapes (STURLA) as an indicator of landscape function applied to surface temperature in New York City, *Ecological Indicators*, 2016, vol. 70, p. 574–585.
- Heckert M., Mennis J. The Economic Impact of Greening Urban Vacant Land: A Spatial Difference-In-Differences Analysis, *Environment and Planning A: Economy and space*, 2012, vol. 44(12), p. 3010–3027.
- Kasimov N.S., Kasatenkova M.S., Tkachenko A.N., Ly-chagin M.Yu., Kroonenberg S.B. *Geokhimiya lagunno-marshovykh i del'tovykh landshaftov Prikaspiya* [Geochemistry of lagoon-marsh and deltaic landscapes of Caspian Sea], Moscow, Liga-vent Publ., 2016, 244 p. (In Russian)
- Kharitonova T., Merekalova K., Moiseev A., Batalova V., Volovinsky I., Ilyinova N., Podgorny O., Slatetskiy K., Sokolov A., Cherkasova V. [The assessment of landscape functions of the Tyumen city urbogeosystems], *Materialy XIII Mezhdunarodnoy landshaftnoy konferentsii, posvyashchonoy stoletiyu so dnya rozhdeniya F.N. Milkova* [Proceedings of the XIII International landscape conference dedicated to the centenary of the birth of F.N. Milkov], V. Mikhno (ed.), Istoki Publ., 2018, p. 275–277. (In Russian)
- Klimanova O.A. Kolbovskii E.Yu. Illarionova O.A. *Zelenaya infrastruktura goroda: otsenka sostoyaniya i proektirovanie razvitiya* [Green infrastructure of a city: state assessment and future development], Scientific Press KMK Publ., 2020, 324 p. (In Russian)
- Kolomin V.V., Rybkin V.S., Chuikov Yu.S., Yaroslavtsev A.S. Osobennosti sostoyaniya vozdukhnoy sredy g. Astrakhani [Special aspects of the aeral environment state in the Astrakhan city], *Natural sciences*, 2015, no. 2(51), p. 28–36. (In Russian)
- Krutsikh N.V., Belashev B.Z. Baza dannykh vyzovov skoroy meditsinskoy pomoshchi kak informatsionnaya osnova geokologicheskikh issledovaniy urbanizirovannykh territoriy [Database of ambulance calls as an information basis for the geoecological study of urbanized areas], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 5, p. 52–62. (In Russian)
- Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2000, vol. 76(2), p. 213–238.
- McPhearson T., Kremer P., Hamstead Z.A. Mapping ecosystem services in New York City: Applying a social-ecological approach in urban vacant land, *Ecosystem Services*, 2013, vol. 5, p. 11–26.
- Nikulina E.M. Landshaftno-geograficheskiy podkhod kak osnova ekologicheskogo karkasa gorodov (na primere g. Astrakhani) [Landscape-geographical approach as a basis of the ecological framework of the cities (case study of the Astrakhan city)], *Natural and technical sciences*, 2009, no. 6(44), p. 441–446. (In Russian)
- Schetke S., Haase D., Kötter T. Towards sustainable settlement growth: A new multi-criteria assessment for implementing environmental targets into strategic urban planning, *Environmental Impact Assessment Review*, 2012, vol. 32, p. 195–210.
- Zanozin V.V., Hudayeva D.N. Morfologicheskaya struktura zonal'nykh landshaftov Astrakhanskoy oblasti [Morphological structure of zonal landscapes of Astrakhan region], *Ekologiya Rossii: na puti k innovatsiyam*, 2016, no. 13, p. 12–16. (In Russian)
- Zemlyanskiy D.Yu., Makhrova A.G., Medvednikova D.M. Metodicheskiye podkhody k sostavleniyu kompleksnykh indeksov sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya gorodov [Methodological approaches to the elaboration of complex indexes of the socio-economic development of cities], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 4, p. 21–29.
- Web sources**
- Earth Engine Apps, URL: <https://yceo.users.earthengine.app/view/uhimap> (access date 15.07.2022).
- Earth Explorers, USGS, URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (access date 15.07.2022).
- General'nyi plan goroda Astrakhani [Astrakhan city site plan], URL: <http://astrgorod.ru/node/3927> (access date 15.07.2020).
- InVEST User Guide, URL: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html> (access date 20.10.2021).
- OpenStreetMap, URL: <https://www.openstreetmap.org> (access date 15.07.2022).

Received 19.11.2022  
Revised 16.04.2023  
Accepted 27.07.2023



## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДА ЛИПЕЦКА

С.А. Куролап<sup>1</sup>, Д.В. Сарычев<sup>2</sup>, И.В. Попова<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Воронежский государственный университет, кафедра геоэкологии и мониторинга окружающей среды

<sup>3</sup> Воронежский государственный технический университет, кафедра жилищно-коммунального хозяйства

<sup>1</sup> Профессор, д-р геогр. наук; e-mail: skurolap@mail.ru

<sup>2</sup> Старший преподаватель; e-mail: sarychev.geo@gmail.com

<sup>3</sup> Доцент, канд. геогр. наук; e-mail: iradobr@yandex.ru

Вследствие высоких темпов урбанизации, увеличения площади и плотности застройки, роста автотранспортной нагрузки и эмиссии техногенного тепла в городах происходит образование положительных температурных аномалий – островов тепла, которые снижают комфортность городской среды, неблагоприятным образом влияют на здоровье и качество жизни населения. Использование и анализ результатов дистанционного зондирования Земли, в частности космической съемки в тепловом диапазоне, является широко применяемым и перспективным методом изучения пространственной структуры городских островов тепла. В работе выполнен анализ материалов космической съемки, полученной с аппаратов Landsat 8 и 9 в 2020–2022 гг. для территории города Липецка. С учетом требований к качеству снимков в исследовании тепловых аномалий отобрано пять зимних и четыре летних снимка. В результате их обработки были построены карты превышений температур подстилающей поверхности над фоном и карты варьирования этих температур по сезонам. Созданные карты позволили выявить местоположения 33 основных источников теплового загрязнения в Липецке. При этом 26 источников расположены на промышленно ориентированном левобережье города – в Октябрьском и Левобережном округах Липецка, в том числе 23 источника относятся к территории Новолипецкого металлургического комбината. Поверхностные температуры их очагов были в среднем выше фоновых значений приблизительно на 4–9°C зимой и 11–14°C – летом. Результаты исследования формируют информационно-методическую основу для космического мониторинга теплового загрязнения в г. Липецке.

**Ключевые слова:** тепловая съемка в инфракрасном диапазоне, Landsat, остров тепла, тепловое загрязнение

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.3

### ВВЕДЕНИЕ

Большинство промышленно-ориентированных городов характеризуются высоким уровнем физико-химического загрязнения атмосферы, шумовым, вибрационным, тепловым и другими видами техногенного воздействия [Григорьева, 2019]. Тепловое загрязнение – это физическое загрязнение, выражающееся в периодическом или длительном повышении температуры окружающей среды выше естественного уровня. Наиболее ярко оно проявляется в образовании на территории городов устойчивых положительных аномалий температуры – островов тепла [Куролап и др., 2018; Сутырина, 2020]. Их интенсивность зависит от естественных природно-климатических условий, а также от инфраструктурных особенностей городской среды – главным образом от площади и плотности застройки, ее теплосодержания, количества жителей. Появление тепловых аномалий в городах связано с источниками антропогенного тепла от промышленных предприятий, транспорта, объектов жилищно-коммунального

хозяйства [Балдина и др., 2012; 2015]. В обозримом будущем на фоне глобальных тенденций потепления климата и продолжающегося роста урбанизации проблема городских островов тепла будет только усугубляться. Возникающие при этом устойчивые локальные изменения температурного режима, как правило, снижают качество городской среды для жизнедеятельности, приводя к ухудшению здоровья и благополучия населения [Попова и др., 2018].

Таким образом, комфортность и безопасность окружающей среды во многом зависит от ее температурного режима, поэтому изучение и сокращение теплового загрязнения городов имеет большое значение в медицинской экологии и городском планировании [Григорьева, 2019; Zhao et al., 2021]. Традиционные метеорологические измерения не позволяют детально исследовать пространственную структуру городских островов тепла и выявить источники теплового загрязнения – это стало возможным с появлением методов дистанционного

зондирования Земли (ДЗЗ), в частности космической съемки в тепловом диапазоне инфракрасного излучения [Балдина и др., 2012; Kaplan et al., 2018; Weng, 2019]. Накопленный опыт исследований в области изучения тепловых аномалий показывает, что ДЗЗ является наиболее часто применяемым и доступным методом исследования температурной неоднородности поверхности Земли [Almedia et al., 2021; Miku, 2019].

Для Воронежа нами проводились такие работы по данным с космических аппаратов Landsat 8 и Terra Aster за 2011–2021 гг., в результате чего было выполнено геоинформационное картографирование летнего, зимнего и ночного состояний городского острова тепла, выявлены главные техногенные источники тепла и оценена их активность. Полученный опыт и накопление данных ДЗЗ за новый зимний и летний сезоны 2022 г. дали возможность исследовать тепловой остров и источники теплового загрязнения г. Липецка. Актуальность исследования связана также с внедрением данных с нового спутника Landsat 9, открытых для общественного использования с 10 февраля 2022 г.

Таким образом, цель данной работы заключалась в выявлении и картографировании источников теплового загрязнения окружающей среды в Липецке по данным ДЗЗ. В задачи работы входили:

1. Анализ результатов ДЗЗ космическими аппаратами Landsat 8 и 9 в 2020–2022 гг. для территории исследуемого городского округа.

2. Геоинформационное картографирование теплового загрязнения исследуемого города по данным ДЗЗ и наземных инструментальных наблюдений.

3. Выявление техногенных источников теплового загрязнения и сбор информации (оценка интенсивности, адрес, географические координаты, название объекта и его юридическая принадлежность) для их мониторинга в г. Липецке.

**Объект исследования.** Объектом исследования являлись температуры подстилающей поверхности и стабильные техногенные источники теплового загрязнения в границах городского округа г. Липецка.

Липецк расположен в лесостепной зоне на западной окраинной части Окско-Донской низменности, на ее стыке с восточной частью Среднерусской возвышенности. Липецк является административным центром Липецкой области. Площадь городского округа составляет 330 км<sup>2</sup>. Высота центра города над уровнем моря – 160 м. Город пересекает река Воронеж, ее протяженность в границах городского округа составляет 30 км. Климат города можно охарактеризовать как умеренно-континентальный, с жарким летом и холодной зимой. Отличается неустойчивостью погоды с колебаниями температуры и неравномерным выпадением атмосферных осад-

ков по временам года. Среднемесячная температура января 8°C, лето теплое, средняя температура июля +20°C. Осадков выпадает около 500 мм, с максимумом в июле. Роза ветров имеет равномерное распределение повторяемости всех направлений ветров по румбам [Беляева и др., 2008].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Данные дистанционного зондирования.** Инфракрасное излучение от земной поверхности в диапазоне длин волн 8–15 мкм формируется за счет суммарного эффекта отраженного и поглощенного солнечного излучения, собственного излучения Земли, а также техногенного излучения. Это суммарное тепловое излучение может регистрироваться сенсорами спутников в виде изображений независимо от времени суток. По таким данным ДЗЗ доступно изучение динамики температур подстилающей поверхности и выявление источников теплового загрязнения [Weng, 2019].

Основными «поставщиками» космической съемки в тепловом диапазоне для гражданских целей являются сенсоры AVHRR, MODIS, VIIRS. Они ежедневно производят съемку всей поверхности Земли, однако, пространственное разрешение таких снимков составляет около 1 км на пиксель, что ограничивает их применение для изучения сравнительно небольших по размерам городских островов тепла. Одним из открытых источников более детальной тепловой съемки являются космические аппараты серии Landsat, в частности спутники Landsat 8 и 9, выполняющие свои миссии ДЗЗ, соответственно с апреля 2013 и с сентября 2021 г. Каждый из этих аппаратов несет на борту оптико-электронный сенсор OLI и ИК-радиометр TIRS. Последний регистрирует тепловое излучение по двум диапазонам: 10,6–11,2 мкм (канал съемки № 10) и 11,5–12,5 мкм (канал съемки № 11). По данным каналам получают 12-битные снимки с охватом территории 183×170 км и пространственным разрешением 100 м/пиксель. Повторение кадра происходит каждые 16 суток приблизительно в 11 часов 20 минут по местному времени независимо от погодных условий [Landsat 8, 2019]. С учетом, обращения аппаратов по орбите в противофазе друг относительно друга, а также существенного перекрытия кадров, выполняемых с соседних витков орбиты, регулярность съемки исследуемых городов рассматриваемыми аппаратами может достигать до одних суток.

Таким образом, для выявления и мониторинга источников теплового загрязнения в г. Липецке перспективно использовать данные с гражданских космических аппаратов Landsat 8 и 9 TIRS. Эти съемочные системы обладают сравнительно высоким пространственным и временным разрешением

в диапазоне теплового излучения, а также являются наиболее актуальными по дате ввода в эксплуатацию, собранные ими данные многозональной съемки на исследуемый город за последние зимние и летние сезоны достаточны для решения поставленных задач. Рассмотрим использованные в исследовании данные ДЗЗ подробнее.

Город Липецк по разграфке WRS-2 попадает в ряд № 23 съемки Landsat, при этом на витке 176 полностью входит в кадр, а на витке 175 – только его восточная половина (Левобережный округ и частично Октябрьский и Правобережный округа). Соответственно, периодичность съемки двумя аппаратами для всей территории г. Липецка составляет восемь суток, а для его восточной половины – до четырех суток.

Несмотря на довольно высокую потенциальную возможность получения данных, число подходящих для исследования снимков ограничено из-за облачности: как правило, за сезон удается получить до пяти пригодных разновременных снимков для города. При меньшем количестве подходящих снимков за 2022 г. мы дополняли временной ряд данными за 2021 и 2020 гг. Все исходные многозональные снимки получали в уровне обработки L1TP из открытого официального источника [United States..., 2022]. Главными критериями отбора снимков были полный охват снимком исследуемой городской территории и отсутствие запечатленных облаков над

ней, а также приближенность даты съемки к зимним и летним сезонам. Безотносительно к календарному определению сезонов, условно считали летними все снимки с середины мая по начало сентября, а зимними – снимки, на которых был запечатлен снежный покров на исследуемой территории.

Устойчивый снежный покров в г. Липецке установился приблизительно в 20-х числах декабря 2021 г. и просуществовал до конца марта 2022 г. – космические снимки за этот период условно считали зимними. В свою очередь, летними считали снимки с середины мая по начало сентября, что для рассматриваемого города в целом соответствует периоду климатического лета. Анализ результатов космической съемки аппаратами Landsat 8 и 9 в обозначенные сезоны 2021–2022 гг. выявил следующую обеспеченность данными: выполнено 13 зимних снимков, из которых облачность над городом полностью отсутствует лишь на четырех: снимки от 8 и 16 января, 25 февраля и 21 марта 2022 г., дополнительно к ним был взят снимок от 14 февраля 2021 г. Летних снимков в 2022 г. было выполнено 15, из которых только 2 пригодны для целей исследования (снимки от 9 июня и 12 августа), в дополнение были взяты летние снимки от 22 июня 2021 г. и 6 августа 2020 г.

Идентификационные данные отобранных снимков и сопутствовавшие съемке метеорологические условия приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Список отобранных космических снимков Landsat 8/9 TIRS  
и метеорологические условия на момент съемки**

| Дата съемки*         | Идентификатор снимка Landsat 8/9 | Температура фона по снимку**, °C | Температура воздуха***, °C |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| <i>Зимние снимки</i> |                                  |                                  |                            |
| 14.02.2021           | LC81760232021045LGN00            | –18,2                            | –17,4                      |
| 08.01.2022           | LC91760232022008LGN01            | –8,3                             | –7,7                       |
| 16.01.2022           | LC81760232022016LGN00            | –6,2                             | –3,5                       |
| 25.02.2022           | LC91760232022056LGN00            | –1,7                             | –0,1                       |
| 21.03.2022           | LC81760232022080LGN00            | +2,3                             | +3,7                       |
| <i>Летние снимки</i> |                                  |                                  |                            |
| 06.08.2020           | LC81760232020219LGN00            | +23,7                            | +27,2                      |
| 22.06.2021           | LC81760232021173LGN00            | +29,0                            | +31,4                      |
| 09.06.2022           | LC81760232022160LGN00            | +23,7                            | +24,0                      |
| 12.08.2022           | LC8176023202224LGN00             | +23,6                            | +28,0                      |

*Примечание.* \* Съемка в указанные даты производилась около 11:20 по местному времени.

\*\* В качестве фоновых значений взяты средние температуры по данным снимков для однородного участка лесопарковой зоны (координаты участка: 52,680° с. ш., 39,718° в. д.).

\*\*\* Данные государственной метеостанции № 27930 «Липецк» в 12:00 по местному времени.

**Расчет поверхностных температур.** Отобранные снимки обрабатывали следующим образом: для каналов съемки № 10 и 11 производили пересчет условных единиц спектральной яркости теплового излучения, записанных в пикселях по соответствующим каналам съемки, в яркостные значения температур ( $T_{DN}$ ) по формуле:

$$T_{DN} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}, \quad (1)$$

где  $L_\lambda$  – спектральная яркость на апертуре сенсора, Вт/(м<sup>2</sup>·ср·мкм);  $K_1$  и  $K_2$  – калибровочные константы (они приводятся в метаданных каждого снимка).

Далее, согласно [Weng et al., 2004], производился пересчет полученных яркостных температур в температуры подстилающей поверхности по формуле:

$$T = \frac{T_{DN}}{1 + \frac{1}{c_2}(\lambda \cdot T_{DN} \cdot \ln \varepsilon)}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны испускаемого излучения;  $c_2$  – константа, определяющая отношение постоянной Планка, помноженной на скорость света, к постоянной Больцмана, и равная  $1,4388 \cdot 10^{-2}$  м·К;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения, или «степень черноты» (например, для асфальта принимали  $\varepsilon = 0,942$ , для бетона  $\varepsilon = 0,937$ , для открытой почвы и газонов  $\varepsilon = 0,928$  и  $0,982$  соответственно [Mallick et al., 2012]).

Далее было произведено усреднение полученных значений температур в пикселях между каналами за каждую дату, затем вычисление превышений температур в каждом пикселе над температурой фоновой подстилающей поверхности, на заключительном этапе – усреднение температур превышений и определение варьирования температур превышений в каждом отдельном пикселе по сезонам. По полученным растровым слоям выявляли тепловые аномалии исследуемой территории визуально и количественно: по выбранной пороговой изотерме средних превышений температур над фоном с учетом их стандартных отклонений. В качестве значений фоновых температур для каждого снимка в пределах исследуемых городских округов был условно взят участок однородной подстилающей поверхности  $100 \times 100$  м – в лесопарковой зоне, удаленной от жилой и промышленной застройки, автомагистралей и прочих объектов инфраструктуры.

Для проведения описанных выше расчетов и картографирования использовали геоинформационную среду QGIS 3.26 и модуль Semi-Automatic Classification Plugin 7.10.8 [Congedo, 2021].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Картографирование городского острова тепла.** В результате обработки отобранных снимков (см. табл. 1) согласно описанной выше методике, были получены производные растровые слои, отображающие превышения температур подстилающей поверхности над фоном в Липецке на каждую дату съемки. Объединение этих растров в мультivременные композитные слои для зимнего и летнего сезонов позволило для каждого получившегося мультivременного пикселя рассчитать среднее значение превышения температуры над фоном и ее стандартное отклонение в каждом сезоне. Полученные таким образом карты (рис. 1) позволяют установить местоположение тепловых аномалий, оценить их относительную интенсивность и стабильность во времени.

На картах А и В (см. рис. 1) оранжевые и красные пятна отображают очаги с наибольшими превышениями температуры над фоновыми значениями и, как правило, соответствуют источникам теплового загрязнения от промышленных зон. Причем красные вкрапления – это в основном отдельные сооружения, от которых происходят эмиссии тепла (например, цеха заводов, дымовые трубы промышленных предприятий, гидротехнические очистные сооружения и др.). Поверхностные температуры для таких объектов зимой 2021/22 г. по данным использованных снимков в среднем на  $3\text{--}5^\circ\text{C}$  превышали температурный фон от окружающих жилых кварталов и на  $5\text{--}7^\circ\text{C}$  – от загородных ненаселенных пространств. В то время как летом средние превышения температур над фоном в этих очагах оценивались уже в  $7,5$  и  $15,5^\circ\text{C}$  соответственно. Оттенки синего цвета на картах А и В показывают участки, где наблюдались температуры ниже фоновых: в зимний сезон (карта А) это, как правило, открытые заснеженные пространства, а летом (карта В) – поверхность воды. В целом, на картах А и В достаточно четко выделяются границы городского острова тепла, видны различия его пространственной структуры в зимний и летний сезоны.

В свою очередь, карты стандартных отклонений Б и Г (см. рис. 1) дают возможность оценить стабильность видимых на картах А и В очагов температурных аномалий. Для карт Б и Г оранжевый и красный цвета индицируют участки с сильной изменчивостью температур внутри сезона, синий показывает территории, где от снимка к снимку в ходе сезона температура в среднем варьировалась минимально. На карте Б видно, что зимой высокие перепады температур больше характерны для городской застройки, в том числе выявленных промышленных зон – это говорит о низкой стабильности приуроченных к ним тепловых аномалий во времени, что



может быть связано с большей амплитудой температур контрастных подстилающих поверхностей, более динамичной циркуляцией атмосферы и, соответственно, более быстрым рассеиванием теплового загрязнения от источников в сравнении с летним сезоном. Летом, наоборот, амплитуда температур для очагов техногенного теплового загрязнения меньше по отношению к абсолютным показателям их температур. На карте Г видно, что летом для ряда очагов отмечены очень высокие перепады температур, особенно для участков, где между датами съемки происходили коренные изменения подстилающей поверхности (например, вырубки и гари леса, распашка полей, осушение или затопление территорий и т. п.).

**Источники теплового загрязнения.** На основе созданных карт были установлены местоположения основных, стабильных во времени источников теплового загрязнения по условно выбранным изотермам средних превышений температур над фоном более чем на  $3,5^{\circ}\text{C}$  зимой и более чем на  $10^{\circ}\text{C}$  летом (рис. 2). Для обеспечения последующего мониторинга были получены координаты выявленных таким образом источников теплового загрязнения – сведения по ним представлены в табл. 2. Выявленные источники теплового загрязнения совпали с местоположениями строений, отдельных цехов или объектов инфраструктуры и локализируются в пределах таких промышленных зон.

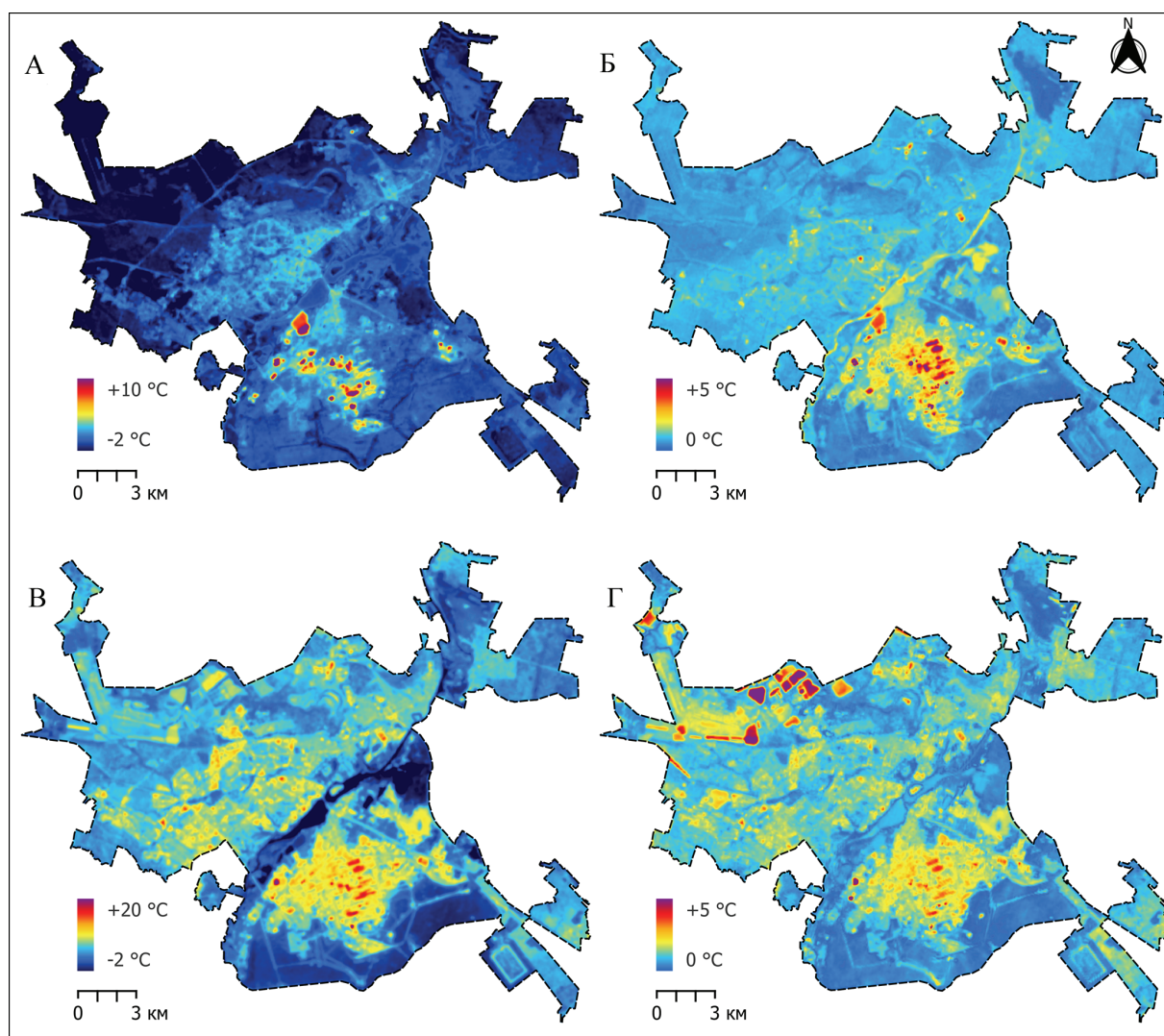


Рис. 1. Карта характеристик теплового острова в пределах городского округа Липецка в 2022 г.:

А – среднее превышение температуры подстилающей поверхности над температурой фона зимой; Б – стандартное отклонение среднего превышения температуры зимой; В – среднее превышение температуры подстилающей поверхности над температурой фона летом; Г – стандартное отклонение среднего превышения температуры летом

Fig. 1. Map of heat island parameters within the urban district of Lipetsk in 2022:

А – mean excess of urban land surface temperature (LST) over the background LST in winter; Б – standard deviations of mean LST excess in winter; В – mean excess of the urban LST over the background LST in summer; Г – standard deviations of mean LST excess in summer

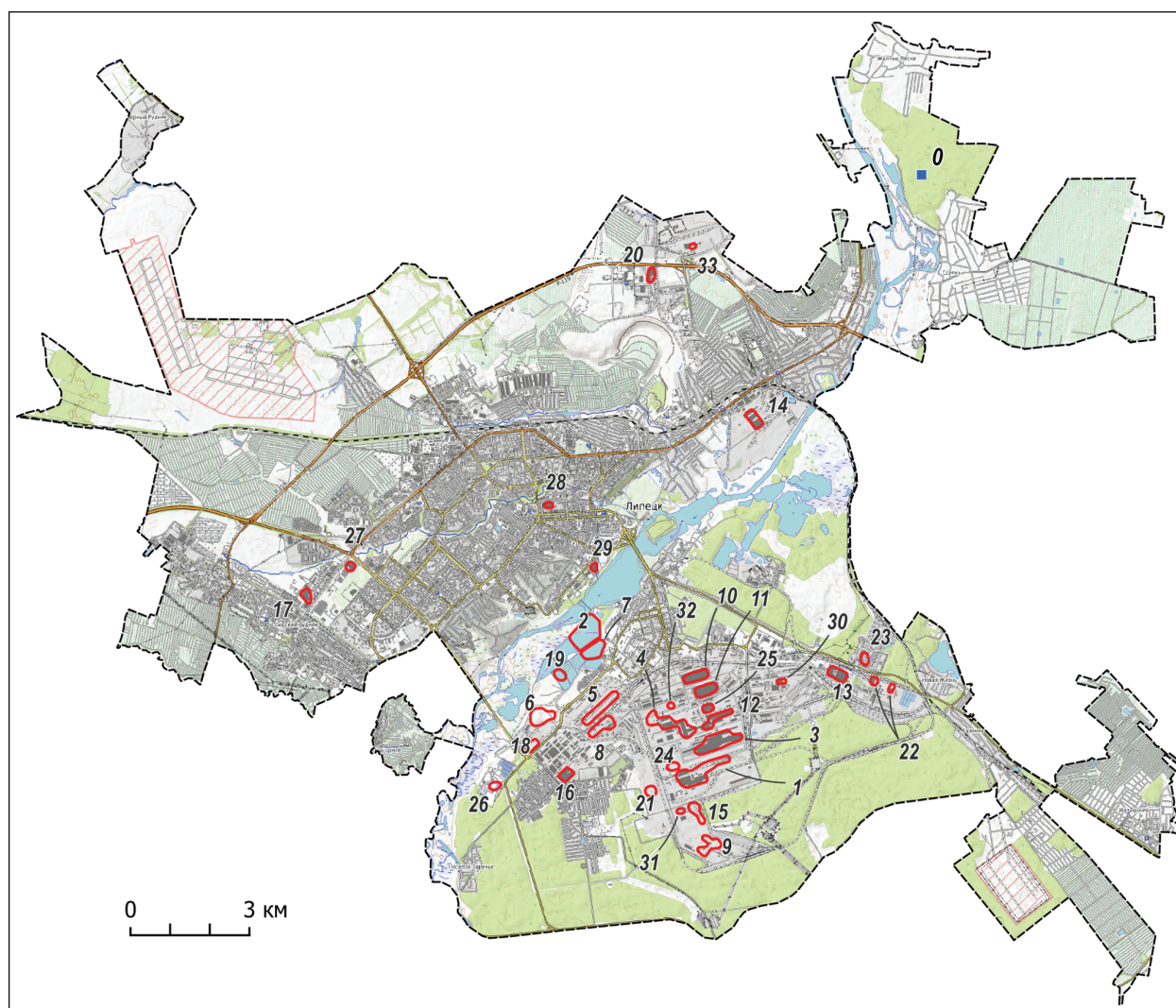


Рис. 2. Карта источников теплового загрязнения г. Липецка на 2021–2022 гг. (нумерация объектов на карте соответствует строкам табл. 2, точка 0 – показывает место определения фоновых значений)

Fig. 2. Map of thermal pollution sources in Lipetsk in 2021–2022 (numbers of objects on the map correspond to the lines of Table 2, point 0 shows the place where the background values were measured)

В городском округе Липецка по данным ДЗЗ нами выявлено 33 основных источника теплового загрязнения, активных в 2021–2022 гг. (см. табл. 2). Из них 26 источников расположено на промышленно ориентированном левобережье Липецка – в Октябрьском и Левобережном округах города, в том числе 23 источника относятся к территории Новолипецкого металлургического комбината (ПАО «НЛМК»). Суммарная площадь выявленных источников теплового загрязнения оценивается по использованным космическим снимкам приблизительно в 310 га, как в зимний, так и в летний сезоны, что составляет около 1% от площади исследованной территории. При этом состав и сезонная активность выявленных источников неравномерна: в зимний и летний сезоны наиболее крупные и интенсивные тепловые следы наблюдались от целого ряда цехов ПАО «НЛМК»

(ПХПП, ЦПМШ, ТЭЦ, конверторные, огнеупорные, агломерационный и коксохимический), а также от Липецкой ТЭЦ-2 и промышленных зон ОАО «Липецкцемент». Для ряда объектов тепловой след в зимний период был относительно более выражен, чем летом, – это характерно, например, для источников тепла от прудов отстойников № 2, 6, 7, доменного цеха и цеха водоснабжения ПАО «НЛМК», а также городских очистных сооружений. В летний сезон относительно более выражены были источники тепла от механосборочных цехов № 4 и 5, цеха подготовки производства, цехов ПТС, ПДС, ПГП и склада ПАО «НЛМК», а также от промышленных зон ОАО «Липецкий металлургический завод “Свободный сокол”», АО «Индезит Интернэшнл», ОАО «Прогресс», ООО «Л-ПАК», а также торгово-развлекательных центров «Ривьера», «Европа», «Л’СИТИ» и др.

Таблица 2

## Основные источники теплового загрязнения города Липецка

| №  | Источник теплового загрязнения<br>(в скобках указан ближайший адрес)             | Географические координаты |             | Площадь объекта по снимку, га | Превышение максимума средних температур очага над фоном*, °С |       |
|----|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|
|    |                                                                                  | град. с. ш.               | град. в. ш. |                               | зимой                                                        | летом |
| 1  | Конвертерный цех № 2 ПАО «НЛМК» (пр. Строителей)                                 | 52,5442                   | 39,6325     | 42,6                          | 18,5                                                         | 18,7  |
| 2  | Пруд-отстойник № 7 ПАО «НЛМК» (ул. Лесная)                                       | 52,5769                   | 39,5915     | 42,5                          | 8,8                                                          | 1,4   |
| 3  | Цех ПХПП ПАО «НЛМК» (пр. Железнодорожников)                                      | 52,5525                   | 39,6419     | 36,8                          | 5,6                                                          | 17,3  |
| 4  | Конвертерный цех № 1 ПАО «НЛМК» (пр. Прокатчиков)                                | 52,5544                   | 39,6279     | 32,0                          | 26,8                                                         | 18,1  |
| 5  | Коксохимическое производство ПАО «НЛМК» (пр. Химиков)                            | 52,5597                   | 39,5965     | 21,8                          | 13,7                                                         | 14,5  |
| 6  | Шлаковый отвал ЦПМШ ПАО «НЛМК» (ул. Metallургов)                                 | 52,5578                   | 39,5724     | 19,7                          | 30,8                                                         | 29,0  |
| 7  | Пруд-отстойник № 6 ПАО «НЛМК» (ул. Лесная)                                       | 52,5729                   | 39,5943     | 18,0                          | 15,6                                                         | 4,2   |
| 8  | ТЭЦ ПАО «НЛМК» (пр. Энергетиков)                                                 | 52,5562                   | 39,5998     | 16,6                          | 9,1                                                          | 12,5  |
| 9  | Доменный цех № 2 ПАО «НЛМК» (пр. Сталеваров)                                     | 52,5289                   | 39,6387     | 14,9                          | 7,0                                                          | 8,7   |
| 10 | Цех ПТС ПАО «НЛМК» (пр. Центральный)                                             | 52,5667                   | 39,6322     | 13,6                          | 3,1                                                          | 16,4  |
| 11 | Цех ПДС ПАО «НЛМК» (пр. Энергетиков)                                             | 52,5636                   | 39,6359     | 13,5                          | 3,0                                                          | 17,1  |
| 12 | Цех ПГП ПАО «НЛМК» (пр. Энергетиков)                                             | 52,5564                   | 39,6375     | 12,5                          | 4,0                                                          | 14,9  |
| 13 | АО «Индезит Интернэшнл» (пл. Metallургов, 2, вл. 3)                              | 52,567                    | 39,6849     | 12,2                          | 1,0                                                          | 14,8  |
| 14 | ОАО «Липецкий металлургический завод “Свободный сокол”» (ул. Студеновская, 126В) | 52,625                    | 39,6548     | 11,5                          | 2,9                                                          | 14,5  |
| 15 | Цех ЦПМШ ПАО «НЛМК» (пр. Сталеваров)                                             | 52,5363                   | 39,632      | 10,3                          | 29,9                                                         | 26,1  |
| 16 | Механосборочные цеха № 4 и 5 ПАО «НЛМК» (ул. Ильича, 4)                          | 52,5447                   | 39,5836     | 8,1                           | 2,1                                                          | 13,9  |
| 17 | ОАО «Прогресс» (ул. Ангарская, вл. 2)                                            | 52,5858                   | 39,4875     | 6,8                           | 1,5                                                          | 16,0  |
| 18 | Цех ЦПМШ ПАО «НЛМК» (ул. Metallургов, станция Шлаковая)                          | 52,5513                   | 39,5709     | 6,4                           | 12,4                                                         | 15,5  |
| 19 | Пруд-отстойник № 2 ПАО «НЛМК» (ул. Metallургов)                                  | 52,5673                   | 39,5816     | 6,2                           | 6,7                                                          | 2,5   |
| 20 | ООО «Л-ПАК» (ул. Ковалева, 125А)                                                 | 52,6579                   | 39,6168     | 5,8                           | 1,2                                                          | 15,3  |
| 21 | Огнеупорный цех ПАО «НЛМК» (пр. Сталеваров)                                      | 52,5408                   | 39,615      | 5,8                           | 18,0                                                         | 14,5  |
| 22 | Агломерационное производство ПАО «НЛМК» (Грязинское шоссе)                       | 52,5653                   | 39,6985     | 5,6                           | 11,2                                                         | 11,3  |
| 23 | Липецкая ТЭЦ-2 (Грязинское шоссе, 5)                                             | 52,5703                   | 39,695      | 5,2                           | 4,8                                                          | 10,7  |
| 24 | Цех ЦПМШ ПАО «НЛМК» (пр. Сталеваров)                                             | 52,5464                   | 39,6234     | 5,0                           | 8,2                                                          | 9,2   |
| 25 | Цех подготовки производства ПАО «НЛМК» (пр. Энергетиков)                         | 52,5595                   | 39,6365     | 4,9                           | 1,6                                                          | 14,8  |
| 26 | Городские очистные сооружения (ул. Краснозаводская, вл. 4А)                      | 52,5423                   | 39,5571     | 4,4                           | 7,1                                                          | 7,5   |
| 27 | ТРЦ Ривьера (ул. Каткова, 51)                                                    | 52,5923                   | 39,5039     | 4,1                           | 1,3                                                          | 14,7  |
| 28 | ТРЦ Европа (ул. Советская, 66)                                                   | 52,6059                   | 39,5778     | 2,8                           | 2,5                                                          | 15,2  |
| 29 | ТРЦ Л’СИТИ (ул. 50 лет НЛМК, 4А)                                                 | 52,5917                   | 39,5946     | 2,7                           | 1,9                                                          | 14,1  |
| 30 | Склад ПАО «НЛМК» (ул. Алмазная, 12В)                                             | 52,5655                   | 39,664      | 2,5                           | 0,5                                                          | 14,7  |
| 31 | Цех водоснабжения ПАО «НЛМК» (пр. Сталеваров)                                    | 52,5362                   | 39,6261     | 2,2                           | 5,4                                                          | 5,2   |
| 32 | Огнеупорный цех ПАО «НЛМК» (пр. Энергетиков)                                     | 52,5602                   | 39,6228     | 2,0                           | 11,4                                                         | 13,2  |
| 33 | ОАО «ЛипецкЦемент» (ул. Ковалева, 126Б)                                          | 52,6644                   | 39,6324     | 1,8                           | 7,8                                                          | 10,4  |

Примечание. \*В качестве фоновых значений взяты температуры лесопарковой зоны (52,680° с. ш., 39,718° в. д.) по данным снимков (см. табл. 1).



В среднем по 33 объектам максимальные температуры от выявленных источников превышали фоновые значения на 13,5°C летом и на 9°C зимой. Особенно выделяется ПАО «НЛМК» по максимальной площади, количеству и интенсивности очагов. Наибольшее превышение – до 31°C над фоновыми температурами зимой и летом – отмечено у шлакового отвала ЦПМШ ПАО «НЛМК» (см. табл. 2).

Выявляемые по картам пространственные структуры городского острова тепла в общих чертах повторяет рисунок застройки с очагами в промышленных зонах, умеренными превышениями температур над фоном в областях плотной жилой застройки и низкими значениями превышений над фоном в зонах малоэтажной жилой застройки. Так, в летний период температура воздуха в условиях городской застройки отличается от фоновых характеристик в среднем на 4,5–5°C, причем наименьшие вариации температуры наблюдаются в частном секторе и на территории застройки средней плотности с достаточным озеленением, а наиболее высокие – на открытых пространствах, вблизи проезжей части крупных дорог, либо на участках плотной высокоэтажной застройки, где минимально внутриквартальное озеленение.

Апробированная нами методика исследования пространственной структуры городского острова тепла имеет определенные ограничения. Они связаны прежде всего с предвзятостью исходных данных: для расчетов и картографирования мы использовали только космические снимки, отражающее состояние объектов в антициклональную погоду, тогда как при наличии облачности характер циркуляции атмосферы иной, что также влияет на структуру и интенсивность теплового острова. В то же время это обстоятельство практически не влияет на точность и полноту выявления источников теплового загрязнения среды. Исходя из объема доступных данных ДЗЗ, нам удалось оценить интенсивность выявленных источников в зимний и летние периоды. Оценка проявления температурных аномалий в отдельные экстремально жаркие и холодные периоды, которые могут быть опасными для населения, в данном исследовании не проводилась, но в перспективе также может быть выполнена для г. Липецка при накоплении большего объема данных.

В ходе более ранних исследований на основе данных ДЗЗ и результатов наземных измерений нами была создана тематическая ГИС «Источники теплового загрязнения городской среды», являющаяся основой для мониторинга теплового загрязнения в г. Воронеже [Сарычев и др., 2021; Sarychev

et al., 2019]. Это исследование позволило расширить территориальный охват созданной тематической ГИС Липецка. Цифровые карты пространственно-временных структур городского острова тепла, входящие в данную ГИС, могут служить для учета влияния термодинамических факторов в изучении распространения загрязняющих веществ в атмосфере. Такие карты необходимо учитывать в моделировании и урбоэкодиагностике состояния воздушной среды, так как структура теплового поля города является определяющим фактором возникновения конвекционных потоков и перераспределения загрязняющих веществ в его атмосфере.

### ВЫВОДЫ

По данным космической съемки, выполненной в тепловом диапазоне съемочными системами Landsat 8 и 9 TIRS за 2021–2022 гг. нами была картографирована структура городского острова тепла г. Липецка в зимний и летний сезоны. По созданным картам в границах городского округа Липецка выявлено 33 основных стабильных источника теплового загрязнения, которые оказались приурочены к объектам инфраструктуры промышленных предприятий, а также к гидротехническим очистным сооружениям и торгово-развлекательным центрам. Поверхностные температуры выявленных очагов были в среднем выше фоновых значений приблизительно на 4–9°C зимой и на 11–14°C летом. Установленные техногенные источники тепла вносят основной вклад в формирование теплового острова г. Липецка. При этом наибольшая концентрация и интенсивность источников теплового загрязнения оказалась характерна для промышленной левобережной части города и связана главным образом с Новолипецким металлургическим комбинатом. Для правобережной части Липецка количество источников теплового загрязнения и интенсивность их проявления оказались сравнительно ниже, а около половины источников оказалось связано с крупными торгово-развлекательными центрами.

Таким образом, на основе данных ДЗЗ были созданы наиболее детальные и точные на текущий момент карты вариаций температур подстилающей поверхности и источников теплового загрязнения г. Липецка. Полученные данные могут служить для учета пространственного влияния термодинамических факторов в медицинской экологии и городском планировании. Проведенное исследование является информационно-методической основой для мониторинга и сокращения теплового загрязнения г. Липецка.

**Благодарность.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172/>.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балдина Е.А., Грищенко М.Ю., Федоркова Ю.В. Использование космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне для географических исследований. М.: Мысль, 2012. 120 с.
- Балдина Е.А., Константинов П.И., Грищенко М.Ю., Варенцов М.И. Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном диапазоне // *Земля из космоса – наиболее эффективные решения*. 2015. № 26. С. 38–42.
- Беляева Л.Н., Зубкова В.Л., Климов С.М. География Липецкой области: природа, население, хозяйство. Липецк: Ориус, 2008. 304 с.
- Григорьева Е.А. Комфорт и здоровье человека в климатических условиях городской среды // *Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы: материалы Международной научно-практической конференции*, Воронеж, 03–05 октября 2019 г. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2019. Т. 2. С. 320–322.
- Куrolap С.А., Попова И.В., Сарычев Д.В., Клепиков О.В., Виноградов П.М. Оценка техногенного загрязнения воздушного бассейна и микроклиматической комфортности городской среды // *Экологическая ситуация и риски для здоровья населения города Воронежа: сб. науч. ст.* Воронеж: Научная книга. 2018. С. 34–56.
- Попова И.В., Куrolap С.А., Закусилов В.П., Мазуров Г.И. Интегральное эколого-микроклиматическое зонирование городской среды (на примере г. Воронежа) // *Естественные и технические науки*. 2018. № 11(125). С. 277–281.
- Сарычев Д.В., Попова И.В., Куrolap С.А. Дистанционное зондирование источников теплового загрязнения города Воронежа // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2021. № 4(19). С. 54–65.
- Сутырина Е.Н. Изучение параметров городских «островов тепла» на территории Иркутской области по данным дистанционного зондирования // *Известия Иркутского гос ун-та. Серия: Науки о Земле*. 2020. Т. 34. С. 131–140.
- Almeida C.R.D., Teodoro A.C., Gonçalves A. Study of the Urban Heat Island (UHI) Using Remote Sensing Data, *Techniques: A Systematic Review. Environments*, 2021, vol. 8(10), p. 105.
- Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS, *Journal of Open Source Software*, 2021, vol. 64, p. 3172.
- Kaplan G., Avdan U., Avdan Z.Y. Urban heat island analysis using the Landsat 8 satellite data: A case study in Skopje. Macedonia, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2018, vol. 2(7), p. 358.
- Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, USGS, EROS, Version 5.0, 2019, 114 p.
- Mallick J., Singh C.K., Shashtri S., Rahman A., Mukherjee S. Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, vol. 19, p. 348–358.
- Miky Y.H. Remote sensing analysis for surface urban heat island detection over Jeddah. Saudi Arabia, *Appl. Geomat.*, 2019, vol. 11, p. 243–258.
- Sarychev D.V., Kurolap S.A., Popova I.V. Verification of Urban Heat Island Microclimatic Model by Using Thermal Remote Sensing Data, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 272, 022085, DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022085.
- Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*, 2004, no. 89, p. 467–483.
- Weng Q. *Techniques and Methods in Urban Remote Sensing*, New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2019, 353 p.
- Zhao Q., Guo Y., Ye T. et al. Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modeling study, *The Lancet Planetary Health*, 2021, vol. 5(7), e415–e425, DOI: 10.1016/s2542-5196(21)00081-4.
- Электронный ресурс  
United States Geological Survey, *EarthExplorer*, URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 20.10.2022).

Поступила в редакцию 08.06.2023

После доработки 15.07.2023

Принята к публикации 27.07.2023

## REMOTE SENSING OF HEAT POLLUTION SOURCES IN THE LIPETSK URBAN AREA

S.A. Kurolap<sup>1</sup>, D.V. Sarychev<sup>2</sup>, I.V. Popova<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Voronezh State University, Department of Geoecology and Environmental Monitoring

<sup>3</sup> Voronezh State Technical University, Department of Housing and Communal Services

<sup>1</sup> Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: skurolap@mail.ru

<sup>2</sup> Senior Lecturer; e-mail: sarychev.geo@gmail.com

<sup>3</sup> Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: iradobr@yandex.ru

Positive temperature anomalies called “urban heat islands” (UHI) are formed in cities as a result of progressing urbanization, increasing area and density of buildings, motor transport load and anthropogenic heat emissions. Such UHI reduce the comfort of the urban environment, and affect population health and quality of life. Remote sensing data from the thermal band satellite sensors are widely used to study the UHI intensity and spatial structure. We analyzed Landsat 8 and 9 satellite imageries from 2020 to 2022 representing the Lipetsk urban area in Central Russia. Taking into account the image quality requirements, 5 “winter” and 4 “summer” scenes were selected to examine thermal anomalies. As a result of their processing a map of land surface temperature (LST) excesses over the background values and a map of LST seasonal variations were compiled. The produced maps made it possible to identify 33 principal sources of anthropogenic heat in Lipetsk. 26 of them are located within industrial zones of the left bank side of Lipetsk, including. 23 sources within the territory of the NLMK Group metallurgical combine. LST of the identified heat sources were approximately 4–9°C above the background temperatures in winter and 11–14°C above the background temperatures in summer. The results of the study could become an information-methodical basis for the space monitoring of thermal pollution in Lipetsk.

**Keywords:** infrared thermal bands, Landsat, urban heat island, thermal pollution

**Acknowledgements.** The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 20-17-00172).

### REFERENCES

- Almeida C.R.D., Teodoro A.C., Gonçalves A. Study of the Urban Heat Island (UHI) Using Remote Sensing Data Techniques: A Systematic Review, *Environments*, 2021, vol. 8(10), p. 105, DOI: 10.3390/environments8100105.
- Baldina E.A., Grishchenko M.Yu., Fedorkova Yu.V. *Ispol'zovanie kosmicheskikh snimkov v teplovom infrakrasnom diapazone dlya geograficheskikh issledovaniy* [Application of satellite images in thermal infrared band for geographical research], Moscow, Mysl Publ., 2012, 120 p. (In Russian)
- Baldina E.A., Konstantinov P.I., Grishchenko M.Yu., Varentsov M.I. Issledovanie gorodskih ostrovov tepla s pomoshch'yu dannykh distancionnogo zondirovaniya v infrakrasnom diapazone [Investigation of urban heat islands using remote sensing data in the infrared band], *Zemlya iz kosmosa – naibolee effektivnye resheniya*, 2015, no. 26, P. 38 – 42. (In Russian)
- Belyaeva L.N., Zubkova V.L., Klimov S.M. *Geografiya Lipeckoj oblasti: priroda, naselenie, hozyajstvo* [Geography of the Lipetsk region: nature, population, economy], Lipeckij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet, Lipeck, Orius Publ., 2008, 304 p. (In Russian)
- Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS, *Journal of Open-Source Software*, 2021, vol. (64), p. 3172, DOI: 10.21105/joss.03172.
- Grigor'eva E.A. [Comfort and human health under the climatic conditions of the urban environment], *Global'nye klimaticheskie izmeneniya: regional'nye efekty, modeli, prognozy* [Global climate change: regional effects, models, forecasts], materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Voronezh, 03–05 oktyabrya 2019 goda, Voronezh, Cifrovaya poligrafiya Publ., 2019, vol. 2, p. 320–322. (In Russian)
- Kaplan G., Avdan U., Avdan Z.Y. Urban heat island analysis using the Landsat 8 satellite data: A case study in Skopje. Macedonia, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2018, vol. 2(7), p. 358, DOI: 10.3390/eers-2-05171.
- Kurolap S.A., Popova I.V., Sarychev D.V., Klepikov O.V., Vinogradov P.M. [Assessment of the technogenic air pollution and microclimatic comfort of the urban environment], *Ekologicheskaya situatsiya i riski dlya zdorov'ya naseleniya goroda Voronezha* [Environmental situation and risks for human health in the city of Voronezh], Sbornik nauchnykh statej, Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2018, p. 34–56. (In Russian)
- Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*, USGS, EROS, Version 5.0, 2019, 114 p.
- Mallick J., Singh C.K., Shashtri S., Rahman A., Mukherjee S. Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, vol. 19, p. 348–358, DOI: 10.1016/j.jag.2012.06.002.
- Miky Y.H. Remote sensing analysis for surface urban heat island detection over Jeddah. Saudi Arabia, *Appl. Geomat*, 2019, vol. 11, p. 243–258, DOI:10.1007/s12518-019-00256-9.

- Popova I.V., Kurolap S.A., Zakusilov V.P., Mazurov G.I. Integral'noe ekologo-mikroklimaticheskoe zonirovaniye gorodskoj sredy (na primere g. Voronezha) [Integral ecological and microclimatic zoning of the urban environment (case study of Voronezh)], *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 11(125), p. 277–281. (In Russian)
  - Sarychev D.V., Kurolap S.A., Popova I.V. Verification of Urban Heat Island Microclimatic Model by Using Thermal Remote Sensing Data, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 272, 022085, DOI:10.1088/1755-1315/272/2/022085.
  - Sarychev D.V., Popova I.V., Kurolap S.A. Distancionnoe zondirovaniye istochnikov teplovogo zagryazneniya goroda Voronezha [Remote sensing of thermal pollution sources in the city of Voronezh], *Zhilishchnoe hozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura*, 2021, no. 4(19), p. 54–65, DOI 10.36622/VSTU.2021.19.4.006. (In Russian)
  - Sutyryna E.N. Izuchenie parametrov gorodskih "ostrovov tepla" na territorii Irkutskoj oblasti po dannym distancionnogo zondirovaniya [Study of the Parameters of Urban Heat Islands within the Irkutsk Region Territory According to Remote Sensing Data], *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta*, Seriya: Nauki o Zemle, 2020, vol. 34, p. 131–140, DOI: 10.26516/2073-3402.2020.34.131. (In Russian)
  - Weng Q. *Techniques and Methods in Urban Remote Sensing*, New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2019, 353 p.
  - Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*, 2004, no. 89, p. 467–483, DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.
  - Zhao Q., Guo Y., Ye T., Gasparrini A., Tong S., Overcenco A., Vicedo-Cabrera A. M. Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study, *The Lancet Planetary Health*, 2021, no. 5(7), e415–e425, DOI: 10.1016/s2542-5196(21)00081-4.
- Web source*  
United States Geological Survey, EarthExplorer, URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 20.10.2022).

Received 08.06.2023

Revised 15.07.2023

Accepted 27.07.2023

## МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 911.37

### ОБЪЕДИНЕННЫЕ ГОРОДА МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ: РЕЗУЛЬТАТ ЭВОЛЮЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ИЛИ АДМИНИСТРАТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Р.А. Бабкин<sup>1</sup>, А.Г. Махрова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, НЛ «Региональная политика и региональные инвестиционные процессы», ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: babkin\_ra@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра экономической и социальной географии России, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: almah@mail.ru

В работе на примере Московской области на основе анализа различной информации, в том числе данных сотовых операторов, проведено исследование такого малоизученного явления, как поглощение одних городов другими. В задачи статьи входила разработка подхода к изучению объединенных городов, включая оценку сохранения их самодостаточности как автономных центров, а также выявления факторов и стадий интеграции.

Выявлено, что в советский период объединение городов в Подмосковье происходило в результате эволюционного развития соседних центров и их слияния. Включение городов в состав соседних центров в последние десятилетия в основном представляет собой результат искусственного объединения в ходе современного этапа муниципальной реформы. На примере трех самых крупных поглощений последнего времени (Химки – Сходня, Балашиха – Железнодорожный, Подольск – Климовск) на основе данных сотовых операторов проведен анализ границ, численности населения и системы внешних связей населения. Показано, что все рассмотренные объединенные города продолжают выделяться как самостоятельные центры (по численности и плотности населения, по их роли локальных центров трудового тяготения).

Изучение поглощенных городов Подмосковья позволило выделить стадии их интеграции. Выявлено, что после формального административного подчинения объединенный центр проходит этапы инфраструктурного и социокультурного слияния, заканчивая стадией полного поглощения. Показано, что под влиянием ряда факторов (географическая близость, численность населения, структура экономики и др.) может происходить ускорение или замедление процессов слияния.

Предложенная в данной статье методика направлена на формирование подхода к изучению поглощенных городов, которые исчезают из поля зрения официальной статистики и специалистов, несмотря на их продолжающееся в течение долгого времени функционирование в качестве самостоятельных центров.

**Ключевые слова:** объединенный город, данные сотовых операторов, факторы слияния, стадии интеграции

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.4

#### ВВЕДЕНИЕ

Изучение городов сталкивается с несколькими серьезными методологическими вопросами. Первый и наиболее старый из них – что же такое город? Несмотря на то что само это понятие интуитивно ясно каждому, однозначного мнения о критериях его выделения не существует. Второй вопрос, во многом связанный с первым, – делимитация границ, так как практически всегда можно наблюдать несоответствие административных границ города реальным.

В России рост внимания к этой теме проявился в ходе муниципальной реформы, когда в состав

городских округов вошли сельские населенные пункты, а понимание того, что такое город, стало совсем запутанным [Глезер и др., 2008]. Можно сказать, что в результате пертурбаций административно-территориального и муниципального деления исчезает сама идея границ как некоего устойчивого атрибута города или муниципалитета, а апогеем этой проблемы можно считать поглощение одних населенных мест другими.

Проходящие поглощения и слияния населенных пунктов заметно трансформируют ткань расселения, причем в одних случаях это вполне закономерный этап развития городов, в других – абсолютно



искусственная, противоречащая логике пространственного развития деятельность. Все эти вопросы формируют исследовательский запрос на разработку подходов к изучению поглощенных городских центров, их границ, условий объединения, а также перспектив развития в новых реалиях.

Рассматривать данную проблематику особенно интересно на примере Московской области. Сложившаяся здесь крайне плотная сеть расселения, особенно в зоне ближних пригородов, где сформировались ареалы почти сплошной высокоплотной городской застройки, делает границы населенных пунктов весьма условными.

Свой вклад вносит и реформа местного самоуправления: в Московской области в последнее время она идет очень активно. Преобразование муниципальных районов в городские округа и ликвидация поселенческого уровня начались в регионе в 2014 г., войдя в активную фазу в 2015–2016 гг. По мнению авторов реформы, она должна мобилизовать ресурсы и оптимизировать систему управления. Предполагается, что данная цель может быть достигнута и за счет ликвидации ряда городов (городских округов или городских поселений) путем их объединения с соседними центрами.

Традиционно более известна, обсуждаема и исследована практика включения городов в состав Москвы при расширении ее территории, что связано со значимостью столицы и с масштабностью таких преобразований. Аналогичные процессы, которые происходили в Московской области, оставались менее замеченными, хотя по количеству объединенных городов Подмосковье практически не уступает Москве (на оба этих региона приходится почти половина всех городов страны, которые в разное время были включены в состав других).

Город обычно мыслится исследователями в качестве целостного объекта изучения, сама природа которого предполагает концентрацию в нем определенного набора экономических, социальных и культурных функций [Glaeser, 2011]. При отсутствии четких критериев выделения города и многообразии применяемых подходов делаются попытки поиска унифицированной методики их делимитации [World..., 2009; Dijkstra et al., 2019]. Высокой популярностью у зарубежных, а в последнее время и отечественных исследователей оказывается изучение так называемого urban sprawl [Oueslati et al., 2016; Dokhov, Sinitsyn, 2020], в контексте которого рассматриваются и растворяющиеся в процессе разрастания ядер агломераций населенные пункты.

В нашей стране проблематикой определения самодостаточности городов и выделения «истинных» (настоящих) городов занимался еще В.П. Семенов-Тянь-Шанский [Семенов-Тянь-Шанский..., 1910].

Спустя век ревизия «истинных» городов была проведена в работе «Город и деревня в Европейской России: сто лет перемен» [Город..., 2001]. В наше время вопрос соответствия реального статуса населенных пунктов официально рассматривается в ряде работ и по столичному региону [Бабури и др., 2003; Махрова и др., 2008; Makhrova, Babkin, 2022]. Отдельная группа работ затрагивает факторы, влияющие в том числе и на процессы объединения и поглощения городов [Перцик, Питерский, 2000; Махрова, Голубчиков, 2012; Голубчиков, Махрова, 2013]. Анализируя реформу местного самоуправления, некоторые исследователи касаются динамики численности населения [Treivish et al., 2022], однако работ по изучению ее влияния на трансформацию сети расселения нет.

Ближе всего к тематике объединенных городов находятся работы по упраздненным городам, которые косвенно или прямо рассматриваются многими исследователями. Так, Г.М. Лаппо, описывая исчезнувшие города Подмосковья, пишет о том, что в советское время «выпадение» из числа городов было связано с их срастанием с соседними центрами, перечисляя все случаи объединения городов [Лаппо, 1972].

Таким образом, изучение именно поглощенных городов – практически новая тематика для отечественной экономической географии. Как и на основе каких данных можно изучать объединенные города? Как долго города, включенные в состав других центров, продолжают сохранять свою самодостаточность? Какие факторы влияют на скорость их интеграции? Какие стадии объединения они проходят? Ответам на эти и другие вопросы будет посвящена данная статья, в которой на примере Московской области будет проведено исследование объединенных городов, в чем и состоит ее новизна.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Если обратиться к существующему мировому опыту, самый распространенный из используемых подходов к выделению городов – законодательно установленный статус [World..., 2019]. Однако он выносит за рамки рассмотрения обширную категорию поглощенных центров, акцент на которые делается в настоящем исследовании. Другими вариантами оценки того, является ли населенный пункт городом, в том числе и включенным в состав другого центра, можно назвать количественно-плотностные, функциональные или экономические характеристики [Город..., 2001; World..., 2019]. Обилие различных подходов естественным образом вызывает необходимость разработки соответствующей методики анализа, базирующейся на всех доступных источниках информации.

Методика анализа объединенных городов Московской области, с акцентом на центрах, поглощенных в ходе реформы местного самоуправления, включает в себя три этапа. На первом из них рассмотрены все девять городов Московской области, в разное время включенных в состав других городов. Для этого, кроме данных официальной статистики, использованы краеведческие материалы, результаты полевых исследований авторов, а также глубинных интервью и социологических опросов.

На втором этапе проведен анализ «ключей» – трех пар объединенных городов (Химки – Сходня, Балашиха – Железнодорожный, Подольск – Климовск), которые представляют собой примеры крупнейших поглощений такого рода, включая выделение их «физических» границ, оценку численности проживающего населения, интенсивности и направлений трудовых маятниковых миграций. В связи с тем, что официальная статистика не дает никаких сведений по упраздненным городам, выполнение этого этапа полностью базировалось на обезличенных данных сотовых операторов о локализации абонентов сети.

Для определения естественных рубежей городов использовался подход, апробированный в работе [Makhrova, Babkin, 2022], который показал, что наиболее адекватно физические границы «реальных» городов можно выделить по ячейкам с плотностью населения не менее 1000 чел./км<sup>2</sup>. Именно эта плотность служит общепризнанным критерием отнесения территории к городским функциональным районам по методике ОЭСР [Dijkstra et al., 2019], позволяя отсечь от города сельские и ненаселенные территории, а также учесть постоянно обитаемую «дачную» субурбию.

Кроме того, применение данных операторов сотовой связи позволило уточнить реальную численность населения городов, включая и упраздненные (в международной практике именно этот критерий, наряду с плотностью населения, принят в качестве ключевого при делимитации городов) [World..., 2018]. В целом данные сотовых операторов корректнее фиксируют численность и плотность наличного населения, что связано с недостижимым для других типов данных пространственно-временным разрешением (ячейки – 500×500 м, временной шаг – 30 мин). В результате выделенные города и сделанные оценки численности населения позволяют показать, насколько объединенный город может быть выделен как самостоятельный центр.

При таком территориальном дроблении мобильные данные, улавливая даже незначительные подвижки населения, позволяют анализировать и систему миграционных связей населения. Анализ зон тяготения маятниковых трудовых мигрантов и направлений выезда и въезда позволяет выявить, насколько упраздненный город сохранил свою

функциональную самодостаточность, остался ли он центром притяжения пригородного населения.

На третьем, завершающем, этапе на основе сделанного анализа, а также дополнительного рассмотрения других примеров поглощений, произошедших в Московской агломерации, были рассмотрены факторы, влияющие на процесс интеграции объединенных городов, и сделана попытка определить стадии их интеграции в зависимости от глубины ассимиляции городом-«поглотителем».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Объединенные города Московской области.*

На территории Московской области насчитывается девять поглощенных городов, четыре из которых (Иваньково, Костино, Новокаширск, Щурово) вошли в состав других центров в результате естественного развития процессов урбанизации еще в советское время, а оставшиеся пять (Железнодорожный, Климовск, Ожерелье, Сходня, Юбилейный) – в ходе муниципальной реформы в последние два десятилетия<sup>1</sup>.

Первая «волна» поглощения более крупными подмосковными центрами соседних, как правило, менее крупных городов пришлась на рубеж 1950–1960-х гг., практически совпав с масштабным расширением границ Москвы в 1960 г.

Начало этому процессу дало вхождение в Калининград (Королев – с 1996 г.) города Костино, который вырос из рабочего поселка вокруг Болшевской трудкоммун. В настоящее время – это центральная часть Королева, на территории которой в 1960-е гг. было построено ОКБ «Звезда» (сейчас головное предприятие ОАО «Корпорация “Тактическое ракетное вооружение”»).

В 1960 г. произошло еще два поглощения, которые касались городов Иваньково и Щурово, расположенных уже в дальнем Подмосковье. Иваньково последовательно прошел путь от деревни, давшей название водохранилищу и ГЭС, рабочего поселка при Волжских гидросооружениях и до города (с 1958 г.). На два года раньше городом стал рабочий поселок Дубно, где в послевоенный период стал быстро строиться научный центр, который в 1958 г. был переименован в Дубну («институтская часть» современного города). В 1960 г. происходит объединение этих двух центров в Дубну, хотя город Иваньково на тот момент времени имел даже несколько большую численность населения (табл.). В настоящее время Иваньковская часть известна как «левый берег» (долгое время она называлась «тридцаткой» по номеру расположенного авиационного завода).

<sup>1</sup> В данной работе не рассматривается включение в 1938 г. на тот момент подмосковного города Кусково в состав Перово, который в 1960 г. и сам вошел в состав Москвы.

Таблица

**Объединенные города Московской области**

| Объединенный город      | Город-«поглотитель»          | Год получения статуса города | Год объединения | Современная стадия интеграции   |
|-------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|---------------------------------|
| Костино (30,4)          | Королев (Калининград) (41,4) | 1940                         | 1959            | Полная                          |
| Иваньково (18,6)        | Дубна (14,0)                 | 1958                         | 1960            | Полная                          |
| Щурово (18,1)           | Коломна (99,7)               | 1947                         | 1960            | Полная                          |
| Новокаширск (9,5)       | Кашира (22,1)                | 1932                         | 1963            | Полная                          |
| Сходня (18,9)           | Химки (225,7)                | 1961                         | 2004            | Инфраструктурно-социокультурная |
| Юбилейный (32,3)        | Королев (187,8)              | 1996                         | 2014            | Инфраструктурно-социокультурная |
| Железнодорожный (152,0) | Балашиха (260,7)             | 1952                         | 2015            | Инфраструктурная                |
| Климовск (56,2)         | Подольск (224,0)             | 1940                         | 2015            | Инфраструктурная                |
| Ожерелье (10,3)         | Кашира (39,9)                | 1958                         | 2015            | инфраструктурная                |

*Примечание.* В скобках дана численность населения на момент присоединения города по данным переписи населения (1959–1963) или текущей статистики (2004–2015).

*Источник:* составлено авторами с использованием данных Росстата.

Щурово – еще один пример поглощенного города, который из сельца превратился в станцию при железной дороге, став рабочим поселком, а затем и городом. На момент его включения в состав довольно крупной Коломны с населением почти 100 тыс. человек это был небольшой промышленный центр людностью менее 20 тыс. человек, который специализировался в основном на промышленности строительных материалов. Сегодня это один из исторических районов города, отделенный от других частей рекой Окой.

Завершает череду объединений подмосковных городов середины XX в. Новокаширск, который вырос из села Терново в связи со строительством ГРЭС. После серии переименований (Терновск – Каганович – Новокаширск) в 1963 г. он вошел в состав Каширы. В настоящее время в этой части города, которая выделяется застройкой в стиле конструктивизма своего исторического ядра – поселка при Каширской ГРЭС, проживает почти половина его населения.

Следующий случай объединения подмосковных городов произошел уже в 2004 г., когда Сходня была включена в состав Химок. В отличие от примеров советского времени здесь главным фактором поглощения стало появление федерального закона №131-ФЗ о местном самоуправлении. Согласно его первой редакции на территории городского округа мог быть только один городской населенный пункт. Власти тогдашнего Химкинского района, не желая менять сложившуюся систему управления из-за появления городских и

сельских поселений в своем составе, пошли по пути ликвидации городских населенных пунктов (города Сходни и поселка Фирсановки) и преобразования всего района в один город Химки, который стал городским округом [Бабурин и др., 2003]<sup>2</sup>.

Волна поглощений последнего времени прошла в 2014–2015 гг., причем ее инициаторами были уже региональные власти, которые решили централизовать систему управления в Московской области, упразднить нижний поселенческий уровень и объединить ряд соседних городов с ликвидацией их как единиц муниципального деления. Аккумулируя ресурсы объединяемых городов – территориальные, финансовые, управленческие, власти рассчитывали привлечь инвесторов и создать дополнительные рабочие места [Таранов, 2014]. При этом реформа имела и негативные последствия, такие как ухудшение уровня доступности муниципальных органов власти, а также расходы, связанные с преобразованиями [Бабейкин, 2023; Попов, Пузанов, 2017]. В числе неблагоприятных эффектов стоит выделить размывание городской идентичности и частичную потерю городами своей власти.

В 2014 г. в состав Королева был включен Юбилейный, имевший статус городского округа. Его появление связано со строительством городка во-

<sup>2</sup> Волна ликвидации городов подобного типа прошла и в других регионах страны, хотя в большей степени она касалась поселков городского типа. Например, в Сахалинской области в 2004 г. селами стали сразу три города (Чехов, Горнозаводск, Красногорск).

енных ученых (закрытый поселок Болшево-1), который получил статус города в 1996 г. Этот небольшой компактный центр площадью около 300 га с населением немногим более 30 тыс. человек практически со всех сторон окружен Королевым, в связи с чем их объединение выглядит вполне логичным. В следующем, 2015 г. как самостоятельные города перестали существовать еще три подмосковных центра: Железнодорожный, Климовск и Ожерелье. Первые два из них были городскими округами, а Ожерелье имел статус городского поселения. Причем их включение в состав более крупных городов вызывает много вопросов.

Железнодорожный на момент включения в состав Балашихи по всем критериям соответствовал статусу города, так как это был один из 19 городов стотысячников в Московской области. На территории этого упраздненного города из-за численности его населения, площади (более 2,4 тыс. га) и протяженности (с запада на восток – 13 км) пришлось создать целых 8 (!) новых микрорайонов Балашихи, названия которым были даны по поселкам и деревням, которые в разное время вошли в состав Железнодорожного (Кучино, Саввино, Купавна и др.). Следует отметить, что против планов объединения довольно активно выступали жители обоих городов. При этом не очень понятно, почему в состав Балашихи не был включен граничащий с нею Реутов<sup>3</sup>, население которого составляло почти 100 тыс. человек, и ряд других территорий, что могло бы привести к созданию и города-миллионера в Московской области.

Климовск с неплохо развитым общественным транспортом, социальной и инженерной инфраструктурой выглядит вполне самостоятельным центром, мало чем уступающим многим другим городам Московской области и по своей людности. Тем не менее одновременно с пгт Львовский он был включен в состав Подольска, что привело к существенному увеличению численности населения последнего, хотя и не вернуло ему позицию лидера, которую уверенно занимает Балашиха в своих новых границах.

На 10 км удален от основной части Каширы и включенный в нее город Ожерелье, развитие которого связано с железной дорогой (до середины 1990-х гг. – крупнейший железнодорожный узел страны). Оба этих центра соприкасаются своими промышленными зонами, а границы между ними хорошо демаркируют многочисленные СНТ.

<sup>3</sup> Как представляется, это вряд ли связано со статусом наукограда, который имеет Реутов. Как показывает практика, его наличие не помешало включению в один городской округ Серпухов двух других наукоградов (Пушино и Протвино), как и Троицка в состав Москвы.

**Границы и численность населения.** Детальный анализ крупнейших поглощений, проведенный на примере трех пар городов-«ключей» (Химки – Сходня, Балашиха – Железнодорожный и Подольск – Климовск), показал, что при взгляде на эти территории сверху границы между отдельными центрами едва ли будут заметны. Лишь незначительные разрывы в практически идентичной застройке и некоторые природные рубежи препятствуют формированию однородного урбанистического ландшафта.

Подмосковные Химки с Долгопрудным и московские районы Куркино и Молжаниновский отличаются весьма причудливым хитросплетением своих официальных границ. Еще более запутанная застройка в районе Балашихи, где практически невозможно отличить друг от друга старые территории города и присоединенного к нему Железнодорожного, Реутова, московского Новокосино, а также поселков, входящих в состав городского округа Балашиха. Наконец, Климовск представляет собой вытянутое на юг продолжение Подольска, который, в свою очередь, представляет собой продолжение протуберанца Москвы по линии Бутово – Щербинка, нанизанного на радиус Курского железнодорожного направления.

В то же время примеры Химок и Сходни, Подольска и Климовска и в меньшей степени Балашихи и Железнодорожного демонстрируют унаследованную барьерную роль границ ранее самостоятельных городов. Как «естественные» структуры расселения они хорошо оконтуриваются по рубежу плотности населения свыше 1000 чел./км<sup>2</sup>, показывая, что все три поглощенных центра продолжают выделяться как отдельные города (рис. 1).

Кроме того, данные сотовых операторов показывают, что в буднюю ночь (эквивалент постоянного населения) на территории Химок в его реальных, а не официальных границах проживает 190 тыс. человек, а в Сходне – 35 тыс. человек. Балашиха даже при такой делимитации остается крупнейшим городом Московской области с людностью в 345 тыс. человек, которой совсем немного уступает Подольск (330 тыс. человек). Железнодорожный с населением 210 тыс. человек входит в десятку крупнейших центров области, а людность Климовска составляет порядка 50 тыс. человек.

Чересполосица муниципальных границ, а также наличие различного рода барьеров приводят к тому, что, хотя со времени «поглощения» Сходни прошло почти 20 лет, по своим фактическим границам и по людности она выделяется как отдельный город. Аналогичным образом воспринимаются Железнодорожный и Климовск. При этом оценку степени их самостоятельности в функциональном плане могут показать связи населения этих центров, прежде всего трудовые маятниковые миграции.



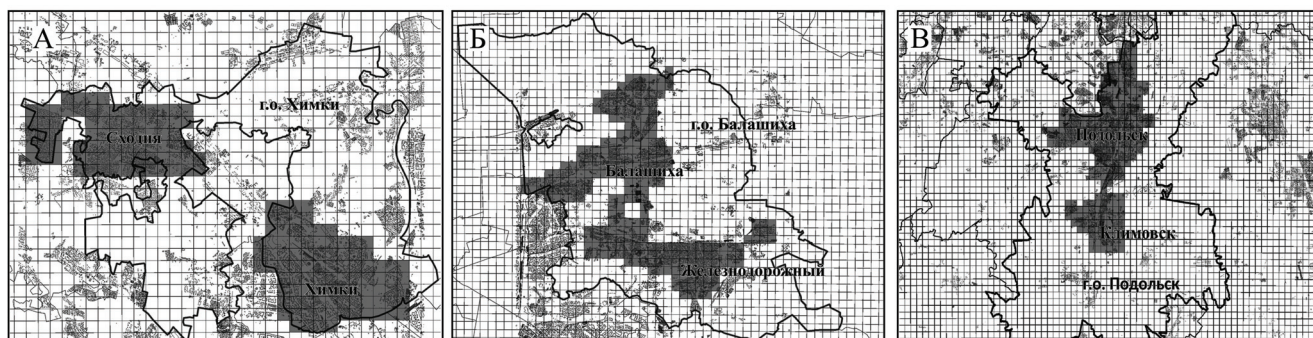


Рис. 1. Выделение границ населенных пунктов по плотности населения 1000 чел./км<sup>2</sup>:

А – Химки и Сходня; Б – Балашиха и Железнодорожный; В – Подольск и Климовск

Fig. 1. Delimitation of settlements according to population density of 1000 inhabitants per 1 sq. km:

А – Khimki and Skhodhya; Б – Balashikha and Zheleznodorozhny; В – Podolsk and Klimovsk

**Трудовые маятниковые миграции.** Примыкающие к МКАД Химки по характеристике связей своего населения являются естественным продолжением Москвы. Фактически Химки соединяют в себе свойства спального района (общая ориентация трудовых корреспонденций на центр Москвы)

и значимого локального центра, ориентирующего на свой рынок труда жителей многих соседних населенных пунктов: Сходни, Лобни, Долгопрудного, Зеленограда, а также ряда районов Северного и Северо-Западного административных округов Москвы (рис. 2).

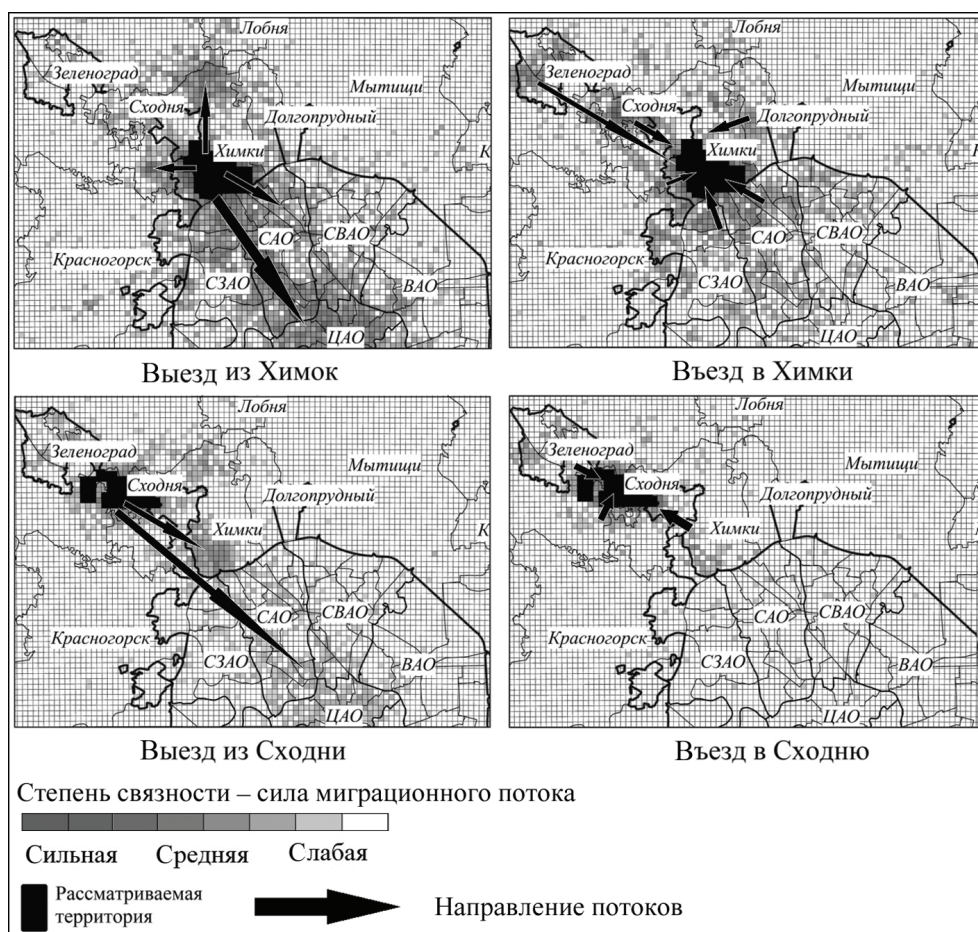


Рис. 2. Ареалы трудовых маятниковых миграций в Химках и Сходне

Fig. 2. Labour commuting areas in Khimki and Skhodhya



Сходня в отличие от своего города-«поглотителя» отличается биполярностью потоков выезжающих из нее жителей, ядрами притяжения для которых в равной степени выступают Химки и центр Москвы. Ареал сбора маятниковых трудовых мигрантов Сходни включает некоторые микрорайоны Химок и Зеленоград. При этом из-за своей удаленности от Москвы она больше привлекает население из Солнечногорского и Клинского районов, практически не являясь центром притяжения для москвичей (за исключением зеленogradцев).

Несколько иная характеристика связей характерна для Балашихи и Железнодорожного (рис. 3). За счет менее привлекательного рынка труда Балашиха обладает довольно небольшим для города такого размера ареалом притяжения пригородного населения, в состав которого входят Реутов и Железнодорожный. При этом москвичи, представленные жителями Восточного округа, составляют лишь небольшую часть работающих в Балашихе (около 5%). Трудовая привлекательность Железнодорожного еще меньше: небольшие объемы маятниковых мигрантов прибывают сюда из Реутова, Балашихи и соседних сельских населенных пунктов.

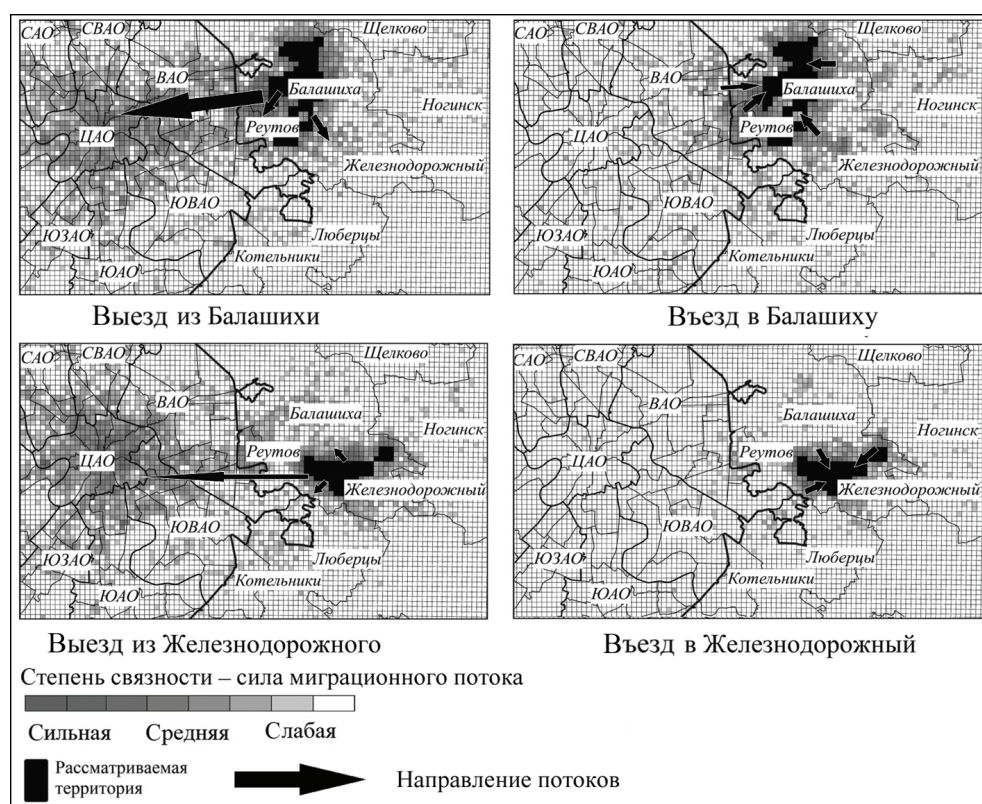


Рис. 3. Ареалы трудовых маятниковых миграций в Балашихе и Железнодорожном

Fig. 3. Labour commuting areas in Balashikha and Zheleznodorozhny

География выезда трудовых маятниковых миграций схожа с рассмотренными центрами: жители Балашихи ориентируются в равной степени на рынок труда Москвы, а также Реутова (роль Железнодорожного весьма мала). Для жителей Железнодорожного картина схожа, однако потоки в Балашиху существенно выше, чем из нее.

Пара Подольск – Климовск в отличие от предыдущих двух не примыкает к МКАД, а располагается во втором поясе пригородов столичной агломерации, что отражается на направлениях и интенсивности пригородных трудовых потоков (рис. 4).

Масштабы выезда жителей Подольска в центр столицы, а также в районы Южного и Юго-Западного АО значительные, хотя и несколько ниже, чем из Химок или Балашихи. Ареал сбора маятниковых мигрантов для города невелик и включает в себя территорию городского округа, а также несколько сопредельных муниципалитетов Новой Москвы (особенно Щербинку) и оба района Бутово. Климовск обладает весьма слабой зоной выезда и въезда маятниковых трудовых мигрантов, взаимодействуя прежде всего с Подольском, что по всей видимости является следствием кризиса промышленной базы этого индустриального центра.

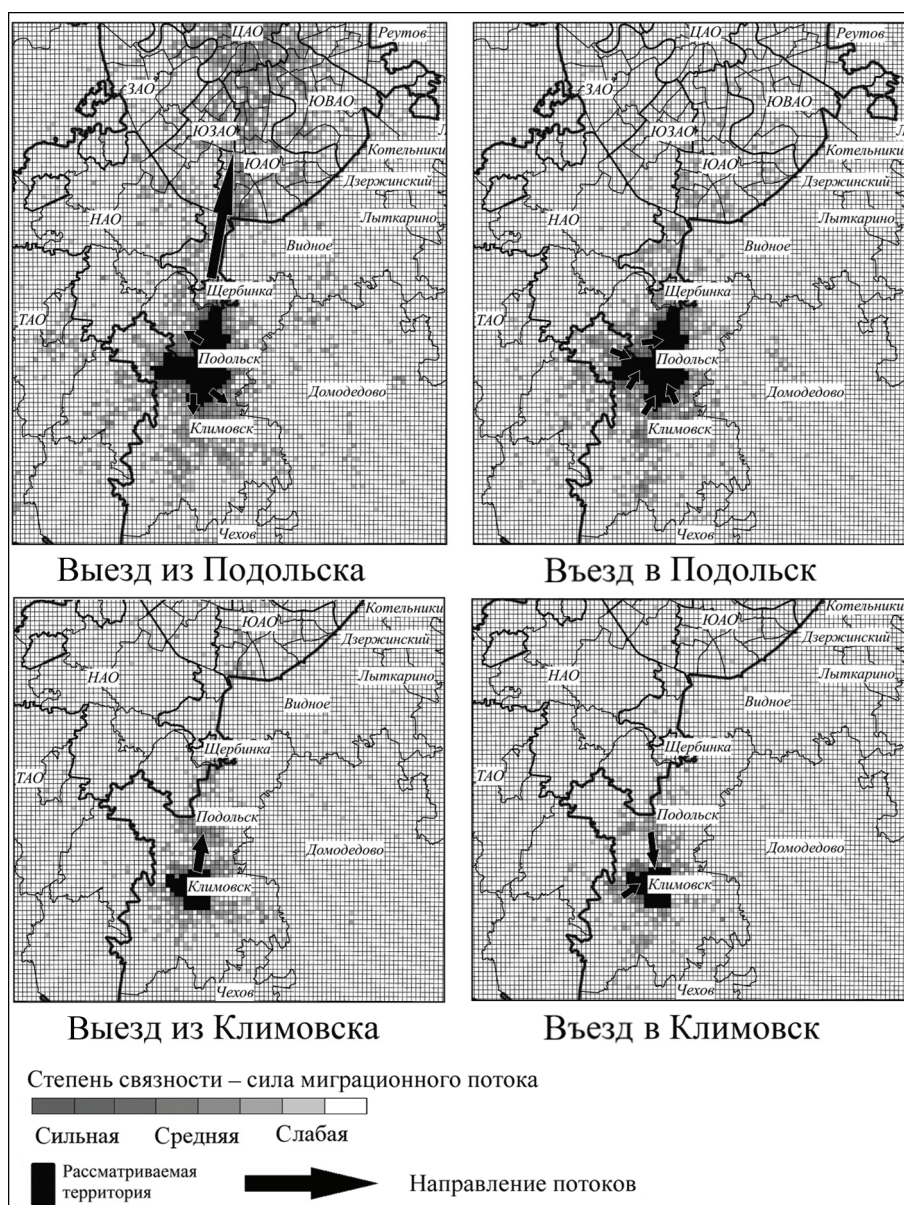


Рис. 4. Ареалы трудовых маятниковых миграций в Подольске и Климовске

Fig. 4. Labour commuting areas in Podolsk and Klimovsk

**Факторы и стадии поглощений.** Процесс поглощения одного города другим не является статичным. Претерпевая постоянные трансформации, он может растягиваться на многие годы и даже десятилетия. Основываясь на рассмотренных примерах объединенных городов, можно выделить ряд факторов, совокупное действие которых определяет скорость и глубину интеграционных процессов.

Одним из основных факторов, влияющих на скорость интеграции, служит *географическая близость*, особенно к ядру агломерации. Удаленность будет замедлять этот процесс, что видно на примере Химок, когда весьма мощный город-поглотитель не может быстро «переварить» поглощаемый город (Сходню), не имея к нему физического доступа. При этом положение вблизи ядра агломерации повышает

шанс «растворения» города в ходе территориального роста ядра и разрастания его пригородной зоны, что можно наблюдать на примере Новомосковского округа Москвы.

Следует отметить, что даже непосредственно контактирующие между собой территории, разделенные естественными преградами, особенно реками, могут продолжать функционирование в формате удаленного от основного городского массива микрорайона, не позволяя поглощенному городу терять свои локальные особенности. Так, Новокаширск достаточно долго существовал в промежуточном состоянии, сохраняя значительную часть своей местной идентичности.

Не менее важный фактор – *численность населения* города-«поглотителя», которая влияет на



скорость интеграции. Как правило, главный город должен обладать в несколько раз большим демографическим потенциалом, чем поглощаемый город. В случае, если различия между городами невелики, то поглощение может приобрести формат взаимного слияния (например, Костино и Калининград) или происходить медленно, что, вероятно, можно ожидать от объединения Железнодорожного и Балашихи.

*Структура экономики* – еще один весомый фактор, влияющий на скорость интеграции городов. Более диверсифицированная и насыщенная третичными функциями экономика Химок способствует развитию у нее собственного рынка труда, привлекательного для населения из своего округа и из других районов Московской области. В то же время индустриальный Климовск формирует весьма слабый ареал притяжения, что в перспективе может привести к его более легкому поглощению Подольском, рынок труда которого имеет сейчас исключительное значение для жителей Климовска.

Можно предположить, что определенную роль играет и *историко-культурный вес* поглощаемого города. Население центров, имевших статус города на протяжении долгих лет, будет дольше сохранять его в своей памяти и медленнее ассимилироваться даже гораздо более крупным центром. Однако в Московской области все присоединенные центры получили статус города в советское время, поэтому роль этого фактора вряд ли будет существенна. Самый длительный городской «стаж» имеют Климовск и Железнодорожный (75 и 63 года, соответственно). Для Климовска с учетом численности его населения, близости к Подольску и состояния экономики этот фактор вряд ли будет заметен. Для Железнодорожного его влияние может проявляться сильнее, так как будет усиливаться значительной людностью.

Пример объединенных городов Московской области показывает, что на начальной стадии поглощение, как правило, фиксируется принятием соответствующих административно-управленческих решений. Однако в дальнейшем под воздействием ряда факторов происходит постепенная интеграция поглощенного города, которая может идти по пути от инфраструктурной, социальной или же ментальной ассимиляции до полного поглощения.

Первичная стадия – это *формальное поглощение* одного города другим, при котором административное объединение часто может производиться даже без учета фактора географической близости населенных пунктов. Например, недавнее присоединение Ожерелья к Кашире, похожая ситуация наблюдалась и в случае Москвы и Троицка или Зеленограда. При таком слиянии города довольно

долгое время остаются функционально независимыми друг от друга, хотя и располагаются в одних административных границах.

Следующая стадия – *«инфраструктурное поглощение»*, когда административное объединение центров приводит к формированию единой инфраструктуры объединенных городов, прежде всего транспортной и социальной, на что существенно может влиять близость населенных пунктов. При этом степень реальной связности остается относительно невысокой, а центры продолжают функционировать сами по себе. К этому типу можно отнести формирование весьма «рыхлых» урбанистических структур, таких как Подольск и Климовск.

Третьей интеграционной стадией стоит считать *«социокультурное поглощение»*, когда происходит уже не только административная и инфраструктурная, но и культурная перестройка городского социума под новые реалии. При этом может проявляться дуализм локальной идентичности (местные жители идентифицируют себя как жителями поглощенного города, так и жителями города-поглотителя). Возможны и переходные ситуации, сочетающие в себе признаки двух стадий, что характерно для современных Химок и Сходни.

Наиболее глубоким этапом слияния является *«полное поглощение»*. В этом случае бывший город полностью перестает развиваться независимо, местные жители воспринимают его не более чем в качестве одного из районов города-«поглотителя», хотя возможно сохранение некоторых архитектурных, топонимических и культурных реликтов. К этому типу можно отнести Костино, поглощенное Королевым более 60 лет назад, или поглощенные в то же время столицей города Перово, Люблино, Тушино, Бабушкин и Кунцево.

Наконец, дополнительно можно выделить и распространённое в свете муниципальной реформы в Московской области *частичное поглощение без потери статуса города* – вариант включения города в состав городского округа, при котором он сохраняет свой городской статус, теряя некоторые административные функции без поглощения города как такового. На сегодняшний день в Московской области десятки примеров такого рода изменения статуса городских центров как единиц муниципального деления. При этом происходящие преобразования приближают нарезку городских округов к сетке административных районов конца советского времени в рамках политики областных властей по централизации и упрощению системы управления. После включения в состав Москвы части территорий Московской области существовавшие в 2012 г. 36 городских округов и 36 муниципальных районов (в их составе было 111 городских и 177 сельских



поселений) к настоящему времени заменены 57 городскими округами.

Основываясь на опыте рассмотренных городов Московской области, можно выделить современную стадию их поглощения (табл.). Для всех городов, слияние которых произошло в конце 1950-х – 1960-е гг., в настоящее время характерна их полная интеграция. Для Химок и Сходни, также как и для Королева с Юбилейным, наблюдается стадия, переходная от инфраструктурной к социокультурной. Для городов, объединение которых произошло в 2015 г., характерен этап инфраструктурной интеграции.

### ВЫВОДЫ

В условиях высоко урбанизированной среды в Московской области, особенно в зоне ближних пригородов Москвы, происходит размывание границ, функций и даже самих городов, что усиливает не всегда логичные и частые изменения в административно-территориальном и муниципальном делении. Упрощение муниципального устройства, когда границы появившихся городских округов в значительной степени совпадают с административными районами конца советского периода, происходит одновременно с трансформацией сети расселения, включая поглощение одних городов другими.

В советский период объединение городов происходило в результате эволюционного развития соседних центров, слияния последних лет зачастую служат примером вмешательства в естественный ход развития городов. В объединении городов власти видят способ повышения эффективности управления и решения многих проблем, хотя сами поглощения часто носят весьма формальный характер.

Анализ объединенных городов Московской области позволил выделить стадии их интеграции (формальная, инфраструктурная, социокультурная, полная). При этом стадия объединения изменчива во времени, а включенный город под влиянием ряда факторов (географическая близость, численность населения, структура экономики и др.) может идти по пути ускорения или замедления процессов слияния.

Возможность изучать объединенные города, которые «пропадают» из зоны видения официальной статистики, вне зависимости от юридических формальностей – неоспоримое преимущество данных сотовых операторов. Рассмотрение поглощенных городов при помощи данных сотовых операторов формирует важный методологический задел для работ в области пространственного развития систем расселения в условиях нестабильности муниципального устройства.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность Департаменту информационных технологий правительства г. Москвы за возможность использовать предоставленные им данные о передвижениях абонентов сотовой связи для написания данной работы.

Разделы «Границы и численность населения», «Трудовые маятниковые миграции», «Факторы и стадии поглощений» написаны Р.А. Бабкиным в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 23-18-00180 «Поливариантность детерминант и трендов экономической динамики муниципальных образований России: концептуализация, идентификация и типологизация в интересах государственного регулирования пространственного развития») в Институте народнохозяйственного прогнозирования РАН. Разделы «Материалы и методика», «Объединенные города Московской области» подготовлены А.Г. Махровой в рамках госбюджетной темы НИР географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 1.17 «Современная динамика и факторы социально-экономического развития регионов и городов России и стран Ближнего Зарубежья».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабейкин Р.В. Вызовы и перспективы укрупнения муниципальных образований на примере Московской области // Вопросы государственного и муниципального управления. 2023. № 1. С. 39–65. DOI: 10.17323/1999-5431-2023-0-1-39-65.
- Бабурин В.Л., Битюкова В.Р., Казьмин М.А., Махрова А.Г. Московский столичный регион: новейшая история и пути развития. Смоленск: Ойкумена, 2003. 184 с.
- Голубчиков О.Ю., Махрова А.Г. Факторы неравномерного развития российских городов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2013. № 2. С. 54–60.
- Глезер О.Б., Бородин Т.Л., Артоболевский С.С. Реформа местного самоуправления и административно-территориальное устройство субъектов РФ // Известия РАН. Сер. геогр. 2008. № 5. С. 51–64.
- Город и деревня в Европейской России: сто лет перемен / П.М. Полян и др. М.: ОГИ, 2001. 557 с.
- Лаппо Г.М. Рассказы о городах. М.: Мысль, 1972. 208 с.
- Махрова А.Г., Голубчиков О.Ю. Российский город в условиях капитализма: социальная трансформация внутригородского пространства // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2012. № 2. С. 26–31.
- Махрова А.Г., Нефедова Т.Г., Трейвиш А.И. Московская область сегодня и завтра: тенденции и перспективы пространственного развития. М.: Новый хронограф, 2008. 344 с.
- Перцик Е.Н., Питерский Д.С. Оценка потенциала развития городов России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2000. № 1. С. 12–17.

- Попов Р.А., Пузанов А.С. Оценка территориальной доступности местного самоуправления: экономико-географическое исследование // Муниципальное имущество: экономика, право, управление. 2017. № 3. С. 24–30.
- Семенов-Тянь-Шанский В.П. Город и деревня в Европейской России. Очерк по экономической географии с 16 картами и картограммами. СПб.: Тип. В.Ф. Кишбаума, 1910. 212 с.
- Таранов О. Один город. В Подмосковье обсуждают объединение Балашихи и Железнодорожного // Аргументы и Факты. 10.12.2014. № 50.
- Dijkstra L., Poelman H., Veneri P. *The EU-OECD Definition of a Functional Urban Area*, OECD Regional Development Working Papers, 2019, 18 p., DOI: 10.1787/20737009.
- Dokhov R.A., Sinitsyn N.A. Sprawl in Russia: Growth and structural transformation of Belgorod suburbia, *Regional Research of Russia*, 2020, vol. 10, no. 2, p. 251–263.
- Glaeser E. *Triumph of the City: How Our Best Invention Makes Us Richer, Smarter, Greener, Healthier, and Happier*, New York: Penguin Press, 2011, 495 p.
- Makhrova A.G., Babkin R.A. Official and “Real” cities: The case study of Moscow Metropolitan Area, *Regional Research of Russia*, 2022, vol. 12, no. 4, p. 506–517.
- Oueslati W., Alvanides S., Garrod G. Determinants of urban sprawl in European cities, *Urban Studies*, 2015, vol. 52, no. 9, p. 1594–1614.
- Treivish A.I., Glezer O.B., Nefedova T.G. Old-Developed Regions of Russia in the Waves of Municipal Reform, *Regional Research of Russia*, 2022, vol. 12, no. Suppl. 1, p. S41–S49.
- World Development Report 2009: Reshaping Economic Geography*, Washington, DC: The World Bank, 2009, 383 p.
- World Urbanization Prospects, The 2018 Revision*, New York United Nations, 2019, 103 p.

Поступила в редакцию 26.06.2023

После доработки 16.07.2023

Принята к публикации 27.07.2023

## UNITED CITIES OF THE MOSCOW REGION: THE RESULT OF EVOLUTIONARY DEVELOPMENT OR ADMINISTRATIVE TRANSFORMATIONS

R.A. Babkin<sup>1</sup>, A.G. Makhrova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Plekhanov Russian University of Economics, Scientific Laboratory for Regional Policy and Regional Investment Processes, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: babkin\_ra@mail.ru*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Economic and Social Geography of Russia, Leading Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: almah@mail.ru*

Using the example of the Moscow region and based on the analysis of various information, including data from cellular operators, we studied a poorly explored phenomenon of absorption of some cities (towns) by others. The objectives of the article included the development of an approach to the study of united cities (towns), including an assessment of the preservation of their self-sufficiency as autonomous centers, as well as the identification of factors and stages of integration.

It is revealed that in the Soviet period the unification of cities (towns) in the Moscow region occurred as a result of the evolutionary development of neighboring centers and their merger. In recent decades the inclusion of cities (towns) into neighboring centers is mainly the result of artificial amalgamation during the current stage of municipal reform. Based on the example of the three largest takeover cases of recent times (Khimki – Skhodnya, Balashikha – Zheleznodorozhny, Podolsk – Klimovsk), and using the data of cellular operators, we analysed the borders, population numbers and the system of external relations of the population. It is shown that all united cities (towns) under consideration continue to be independent centers (in terms of population size and density, and their role as local centers of labor gravity).

The study of the absorbed cities (towns) of the Moscow region made it possible to identify the stages of their integration. It is revealed that after formal administrative subordination, the united center goes through the stages of infrastructural and socio-cultural merger, ending with the stage of complete absorption. It is shown that under the influence of a number of factors (geographical proximity, population size, economic structure, etc.), merger processes can accelerate or slow down.

A methodology proposed in the article is aimed at forming an approach to the study of absorbed cities (towns). The latter disappear from the field of view of official statistics and specialists, despite their continued functioning as independent centers for a long time.

**Keywords:** united city, mobile operator data, merger factors, integration stages

**Acknowledgments.** The authors are grateful to the Department of Information Technologies of Moscow for the opportunity to use their data on the movements of mobile network subscribers for this research.

The sections “Borders and population size”, “Systems of external relations: labor commuting” and “Factors and stages of takeovers” were written by R.A. Babkin with financial support of the Russian Science Foundation (project No. 23-18-00180 “Polyvariance of determinants and trends in the economic dynamics of Rus-

sian municipalities: conceptualization, identification and typology in the interests of state regulation of spatial development”) at the Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences. The sections “Materials and Methods” and “United Cities of the Moscow Region” were prepared by A.G. Makhrova within the framework of the state budget research topic of the MSU Faculty of Geography No 1.17 “Modern dynamics and factors of socio-economic development of regions and cities in Russia and the near-abroad countries”.

## REFERENCES

- Babeykin R.V. Vyzovy i perspektivy ukрупneniya munitsipal'nykh obrazovaniy na primere Moskovskoy oblasti [Challenges and prospects for the enlargement of municipalities on the example of the Moscow region], *Voprosy gosudarstvennogo i munitsipal'nogo upravleniya*, 2023, no. 1, p. 39–65, DOI 10.17323/1999-5431-2023-01-39-65. (In Russian)
- Baburin V.L., Bityukova V.R., Kaz'min M.A., Makhrova A.G. *Moskovskiy stolichnyy region: noveyshaya istoriya i puti razvitiya* [Moscow metropolitan region: recent history and ways of development], Smolensk, Oikumena Publ., 2003, 184 p. (In Russian)
- Dijkstra L., Poelman H., Veneri P. *The EU-OECD Definition of a Functional Urban Area*, OECD Regional Development Working Papers, 2019, 18 p., DOI: 10.1787/20737009
- Dokhov R.A., Sinitsyn N.A. Sprawl in Russia: Growth and structural transformation of Belgorod suburbia, *Regional Research of Russia*, 2020, vol. 10, no. 2, p. 251–263.
- Glaeser E. *Triumph of the City: How Our Best Invention Makes Us Richer, Smarter, Greener, Healthier, and Happier*, New York, Penguin Press Publ., 2011, 495 p.
- Glezer O.B., Borodina T.L., Artobolevskiy S.S. Reforma mestnogo samoupravleniya i administrativno-territorial'noye ustroystvo sub'yektov RF [Reform of local self-government and the administrative-territorial structure of the subjects of the Russian Federation], *Izvestiya RAN, Ser. geogr.*, 2008, no. 5, p. 51–64. (In Russian)
- Golubchikov O.Yu., Makhrova A.G. Factors of Unequal Development of Russian Cities, *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2013, no. 2, p. 54–60. (In Russian)
- Gorod i derevnya v Evropeiskoi Rossii: sto let peremen* [City and Village in European Russia: One Hundred Years of Change], P.M. Polyan et al. (eds.), Moscow, O.G.I. Publ., 2001, 557 p. (In Russian)
- Lappo G.M. *Rasskazy o gorodakh* [Stories about cities], Moscow, Mysl' Publ., 1972, 208 p. (In Russian)
- Makhrova A.G., Babkin R.A. Official and “Real” cities: The case study of Moscow Metropolitan Area, *Regional Research of Russia*, 2022, vol. 12, no. 4, p. 506–517.
- Makhrova A.G., Golubchikov O.Yu. Rossijskij gorod v usloviyakh kapitalizma: sotsialnaya transformatsiya vnutrigrorodskogo prostranstva [Russian Town under Capitalism: Social Transformation of Intraurban Space], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2012, no. 2, p. 26–31. (In Russian)
- Makhrova A.G., Nefedova T.G., Treyvish A.I. *Moskovskaya oblast'segodnya i zavtra: tendentsii i perspektivy prostranstvennogo razvitiya* [Moscow oblast today and tomorrow: trends and prospects for spatial development], Moscow, Novyi Khronograf Publ., 2008, 344 p. (In Russian)
- Oueslati W., Alvanides S., Garrod G. Determinants of urban sprawl in European cities, *Urban Studies*, 2015, vol. 52, no. 9, p. 1594–1614.
- Percik E.N., Pitserskiy D.S. Otsenka potentsiala razvitiya gorodov Rossii [Assessment of the development potential of Russia's cities], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2000, no. 1, p. 12–17. (In Russian)
- Popov R.A., Puzanov A.S. Otsenka territorial'noy dostupnosti mestnogo samoupravleniya: ekonomiko-geograficheskoye issledovaniye [Assessment of the territorial accessibility of local self-government: an economic and geographical study], *Munitsipal'noye imushchestvo: ekonomika, pravo, upravleniye*, 2017, no. 3, p. 24–30. (In Russian)
- Semenov-Tyan-Shanskii V.P. *Gorod i derevnya v evropeiskoi Rossii. Ocherk po ekonomicheskoi geografii s 16 kartami i kartogrammami* [City and Village in European Russia. Essay on Economic Geography with 16 Maps and Cartograms], St. Petersburg, Tip. V.F. Kirshbauma Publ., 1910, 212 p. (In Russian)
- Taranov O. Odin gorod. V Podmoskov'ye obsuzhdayut ob'yedineniye Balashikhi i Zheleznodorozhnogo [One city. They discuss the merging of Balashikha and Zheleznodorozhny towns in the Moscow region], *Argumenty i Fakty*, 10.12.2014, no. 50. (In Russian)
- Treyvish A.I., Glezer O.B., Nefedova T.G. Old-Developed Regions of Russia in the Waves of Municipal Reform, *Regional Research of Russia*, 2022, vol. 12, no. Suppl. 1, p. S41–S49.
- World Development Report 2009: Reshaping Economic Geography*, Washington, DC, The World Bank Publ., 2009, 383 p.
- World Urbanization Prospects. The 2018 Revision*, New York, United Nations Publ., 2019, 103 p.

Received 26.06.2023

Revised 16.07.2023

Accepted 27.07.2023



## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ АГРОБИОМАССЫ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ, КРАСНОДАРСКОМ И СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЯХ

Т.И. Андреев<sup>1</sup>, С.В. Киселева<sup>2</sup>, Ю.Ю. Рафикова<sup>3</sup>

<sup>1–3</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИИ возобновляемых источников энергии*

<sup>1</sup> *Ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: tanyandr00@mail.ru*

<sup>2</sup> *Вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: k\_sophia\_v@mail.ru*

<sup>3</sup> *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ju.rafikova@mail.ru*

В настоящее время использование органических отходов для получения энергии стало значимым направлением мировой энергетики. При этом решается не только задача энергообеспечения, но и утилизации отходов. Особый интерес в связи с большими объемами ежегодно формируемого ресурса, возможностью обеспечить недорогую логистику и востребованностью получаемой энергии на уровне местного потребления привлекает задача утилизации отходов сельского хозяйства. В работе представлена методика оценки энергетического потенциала отходов растениеводства с учетом вида сельскохозяйственных культур, энергосодержания и особенностей технологии их переработки с получением тепловой энергии. В качестве территорий исследования выбраны регионы России – лидеры по производству зерновых, подсолнечника и кукурузы (Ставропольский и Краснодарский края, Ростовская область) – как в силу значительности энергетического потенциала, так и в связи с наличием опыта получения энергии из отходов на Юге России. Определены количественные показатели тепловой энергии из отходов этих культур (по регионам суммарно по всем культурам 61,32, 128,1 и 122,22 млн ГДж/год), а также доля покрытия нагрузки теплоснабжения в жилом секторе регионов (124, 120 и 160%). Методами кластерного анализа определены группы муниципальных районов, самодостаточных по этому местному энергоресурсу, а также потенциальных «доноров» топлива из отходов. Результаты отображены на диаграммах и серии карт.

**Ключевые слова:** биоэнергетика, сельскохозяйственные отходы, ресурсы, потенциал энергообеспечения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.5

### ВВЕДЕНИЕ

Стремление к диверсификации энергетических ресурсов и сокращению воздействия на окружающую среду объектов традиционной энергетики и полигонов органических отходов стимулирует развитие современной биоэнергетики, которая достигла к настоящему времени значительных масштабов. В 2020 г. мировая биоэнергетика обеспечила производство около 44 ЭДж энергии в целом, из которых 14,7 ЭДж тепловой энергии (7,6% глобального потребления тепла), 3,7 ЭДж – на транспортные нужды (3,5%) и 1,8 ЭДж – на электроснабжение (2,4%). Максимальные темпы роста биоэнергетических мощностей наблюдаются в электроэнергетике: в 2021 г. установленная мощность электростанций на биомассе в мире достигла 158 ГВт [REN21..., 2022].

Развитие биоэнергетики идет интенсивно в разных регионах мира, особенно активно в Европейском Союзе (ЕС) в связи с целым комплексом факторов, в том числе климатическими обязательствами, задачами повышения энергонезависимости и экологическими проблемами обращения с отхо-

дами производства и потребления. В странах ЕС в силу больших объемов сельскохозяйственного производства технический энергетический потенциал отходов варьирует от 0,8 до 3,9 ЭДж/год. Лидером по энергетическому использованию отходов растениеводства, в первую очередь соломы, является Дания, где из ежегодно образуемых 6 млн т соломы более 1,5 млн т сжигается для производства энергии [Danish energy sector..., 2022]. В Великобритании эксплуатируется свыше 80 электростанций на биомассе (древесина, подстилочный материал птицефабрик, смесовое топливо (биомасса и уголь)) общей мощностью более 4000 МВт, в том числе самые крупные в мире ТЭЦ на соломе. Технологии производства энергии из растительных остатков активно развиваются и в других странах ЕС: Польше, Испании, Италии и Швеции. В лидеры биоэнергетики вышел Китай, где оценки потенциала только растительных остатков сельскохозяйственного производства дают около 536 ЭДж/год; при этом в стране развивается использование для электро- и теплоснабжения остатков заготовки леса и твердых

бытовых отходов. К 2020 г. введено в эксплуатацию более 1300 электростанций на биомассе с установленной мощностью 29 520 МВт и производством электроэнергии 13 260 ГВтч/год [Guo et al., 2022].

Исследования различных аспектов развития биоэнергетики на сельскохозяйственных отходах широко представлены в научной литературе. Анализ зарубежных работ позволяет выделить следующие основные актуальные направления в тематической области:

1. Определение энергетического потенциала биомассы отходов от основных источников (лесного и сельского хозяйства, а также энергетических плантаций) с учетом технических характеристик технологий биоэнергетики в региональном [Bentsen, Felby, 2012; Fraia et al., 2020] и глобальном масштабах [Berndes et al., 2003; Offermann et al., 2003].

2. Совершенствование алгоритма оценки энергетического потенциала растительных остатков сельскохозяйственных культур путем уточнения удельного образования отходов, их энергосодержания, доступных объемов отходов для выноса с пашни в зависимости от региональных условий. Определение оптимального местоположения объектов переработки отходов на основании пространственного распределения потенциала энергетических ресурсов с помощью геоинформационных методов анализа [Sliz-Szkliniarz, Vogt, 2012; Karan, Hamelin, 2021; Guler et al., 2022].

3. Оценка на региональном или локальном уровне экономической эффективности производства и использования различных видов топлива из сельскохозяйственных отходов [Somerville, 2006; Kpallo et al., 2022; Bilandzija et al., 2018, Ruiz et al., 2019].

Несмотря на значительную ресурсную базу, доля биоэнергетики в энергетическом балансе России оценивается в настоящее время в 1–1,6%. В некоторых субъектах РФ работают электростанции и котельные на биотопливе из отходов лесного комплекса и древесной щепы [Ракитова, 2021]. Производство древесных пеллет в 2020 г. достигло 2,2 млн т/год и до недавнего времени было ориентировано, в основном, на экспорт. В связи с потерей зарубежного рынка биотоплива Правительством РФ предусмотрено стимулирование перевода мазутных котельных на древесные пеллеты. Сельскохозяйственные отходы – более сложное сырье, требующее зачастую иных, по сравнению с древесными отходами, технологических решений (например, в связи с большим содержанием хлора, натрия и калия в соломе зерновых, а также низкой температурой плавления золы этих культур). Однако огромные объемы ежегодного образования этих отходов, значительная часть которых сжигается на полях и плантациях, накопленный опыт их утилизации за рубежом, раз-

вивающийся отечественный рынок оборудования позволяют считать энергетический потенциал этих ресурсов в наиболее развитых сельскохозяйственных регионах страны перспективным. Зерновые, масличные и технические культуры занимают более  $\frac{2}{3}$  всех посевных площадей России. Утилизация послеуборочных остатков на полях представляет для российских сельхозпроизводителей давнюю проблему, требующую дополнительных материальных и трудовых затрат. Традиционное ежегодное сжигание стерни и пожнивных растительных остатков на полях, особенно в Центральном и Южном ФО, является причиной порядка 30% лесных пожаров. Однако масштабного развития биоэнергетики на сельскохозяйственных отходах до недавнего времени не происходило, в основном (по данным опросов) вследствие дефицита информации и технических средств для реализации проектов. С 2010-х гг. эту нишу постепенно начали заполнять иностранные и отечественные производители оборудования для изготовления пеллет из агросырья и отопительных систем различной мощности.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основы методики оценки объемов отходов сельскохозяйственной продукции и их энергосодержания были разработаны еще в 1990-х гг. и вошли в документы различных международных организаций [Ryan, Openshaw, 1991]. Алгоритм расчетов верифицирован и применяется в большинстве исследований в предметной области. Он включает последовательное определение следующих величин:

- основные сельскохозяйственные культуры региона и площади под ними;
- урожайность сельскохозяйственных культур (пшеница, рожь, ячмень, овес, кукуруза, рис, рапс, подсолнечник и др.);
- отношение пожнивных остатков к урожайности;
- энергосодержание отходов в зависимости от вида культуры;
- скорость и степень удаления пожнивных остатков в соответствии с экологическими ограничениями и требованиями сохранения плодородия почвы;
- доля растительных остатков, используемых для подстилки животным (крупный рогатый скот, лошади и овцы), производства грибов и в отраслях промышленности.

Существуют различия в подходах к оценкам ресурсов биомассы (фактического объема образующихся отходов). В одном случае биомасса отходов оценивается как произведение валового сбора урожая культуры и индекса урожая (отношения массы всей надземной части растения к массе полезной

части). При втором подходе посевная площадь, с которой убран урожай, умножается на коэффициент массы отходов, приходящейся на единицу площади поля. Соотношение полезной части растения к остатку для большинства сельскохозяйственных растений определялось в многочисленных исследованиях [Ryan, Openshaw, 1991; Коррежан, 1997; Jolli, Giljum, 2005]. Эти работы показали, что выбор средних значений приводит к значительным погрешностям, поскольку соотношения различаются как между основными сортами культур, так и для одного и того же сорта, выращиваемого в разных условиях. Именно изменчивость экологических и агрономических факторов служит одной из причин разброса оценок объемов отходов растениеводства и, следовательно, общего объема ресурсов биомассы для биоэнергетики как в общенациональном, так и в глобальном масштабе. Все энергетические ресурсные потенциалы выражаются через низшую теплотворную способность первичной биомассы, которая также определяется экспериментально для каждой культуры [Клюс, Забарный, 2011].

В России методика оценки биоэнергетических ресурсов была развита в связи с исследованиями ресурсов и потенциалов возобновляемых источников энергии, инициированными Министерством

энергетики РФ в начале 2000 г. [Справочник по ресурсам..., 2007]. В Атласе [Атлас ресурсов..., 2015] был расширен спектр источников органических отходов, однако оценки были проведены с детализацией до субъектов РФ, что не обеспечивает достаточную точность, особенно для крупных по площади субъектов РФ.

В представленной работе при оценке потенциала биоэнергетики в качестве ресурсов рассматривались органические отходы однолетних пропашных культур (зерновых, кукурузы, подсолнечника), образующиеся на территории Краснодарского, Ставропольского краев и Ростовской области с детализацией до муниципальных образований. Для определения энергии, заключенной в биомассе отходов (валовый энергетический потенциал), использовались значения массы отходов и их удельное энергосодержание (низшая теплота сгорания). Масса ежегодно образующихся органических отходов пропашной культуры вида  $i$  ( $M_i$ ) рассчитывалась с использованием статистических данных о годовом валовом сборе культуры ( $N_i$ ) и коэффициентов соотношения отходов и полезной части растения ( $L_i$ ) (табл. 1):

$$M_i = N_i \cdot L_i, \tag{1}$$

Таблица 1  
Доля отходов в общей массе продукции растениеводства и их энергосодержание [Клюс, Забарный, 2011]

| Вид исходной биомассы      | Коэффициент соотношения отходов и полезной части растения, кг/кг | Удельное энергосодержание отходов, МДж/кг |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Зерновые культуры          | 1,0                                                              | 14,70 (для воздушно-сухой соломы)         |
| Кукуруза на зерно (стебли) | 1,2                                                              | 13,73 (для воздушно-сухих отходов)        |
| Подсолнечник на зерно:     |                                                                  |                                           |
| – стебли                   | 3,5                                                              | 13,44                                     |
| – лузга                    | 0,18                                                             | 15,75                                     |

Тогда валовый энергетический потенциал (энергия образующихся за год органических отходов) рассчитывался как произведение массы отходов на их удельное энергосодержание ( $K_i$ ):

$$Q_i = M_i \cdot K_i. \tag{2}$$

Валовый сбор урожая сельскохозяйственных культур определялся на основе данных Росстата 2019 г. различного уровня генерализации (субъекты РФ / муниципальные образования) [Валовый..., 2023; Площади..., 2023]. Технический энергетический потенциал биомассы отходов (количество энергии, которое возможно произвести из доступной биомассы современными технологиями с

учетом экологических и иных ограничений) рассчитывался на основе валового потенциала в предположении, что электроэнергию и тепло получают на мини-ТЭС с прямым сжиганием биомассы. При этом учитывались коэффициенты преобразования энергии биомассы в тепло и электроэнергию (соответственно 0,80 и 0,35), а также доля тепла и электроэнергии на собственные нужды установок (0,14 и 0,03).

В ряде региональных исследований был проведен анализ и обоснована экономическая эффективность использования в энергетических целях отходов сельскохозяйственного производства, в первую очередь соломенных пеллет (в том числе, торрефицированных), в регионах РФ с наиболее развитым растениеводством – Краснодарский, Ставрополь-



ский края, центральный и южные районы Ростовской области, Воронежская область и др. [Передезий, 2010]. Рентабельность использования отходов масличных культур (лузга подсолнечника) в котельных и мини-ТЭЦ была достигнута на многих комбинатах растительных масел (например, на Миллеровском и Морозовском маслоэкстракционных заводах Ростовской области [Володарец, 2021]).

Общие экономические оценки даже на уровне субъектов РФ в данной области делать достаточно сложно в связи с зависимостью результатов от местных условий, а именно территориального распределения источников отходов (сельскохозяйственных предприятий), потенциальных местных потребителей, действующих объектов энергогенерации, видов используемого сырья, цен на отпускаемую тепловую и электрическую энергию. Поэтому первым этапом таких оценок является анализ ресурсов и энергетического потенциала отходов, формирующихся в субъектах и муниципальных образованиях.

Краснодарский и Ставропольский края, а также Ростовская область являются лидерами среди регионов России по производству зерна. Соответственно по регионам валовый сбор зерна в хозяйствах всех категорий составил (в 2022 г.) – 14 794 100, 9 101 500 и 13 542 500 т), кукурузы (в 2019 г.) – 2 517 000, 729 000, 789 000 т [Валовой... по категориям хозяйств..., 2023], подсолнечника (в 2021 г.) – 1 070 000 т в Краснодарском крае, 1 900 000 т в Ростовской области. Эти регионы очень неоднородны по уровню самообеспеченности энергоресурсами. Если Краснодарский край по электроэнергетическому балансу является хронически дефицитным (отношение производства к потреблению в 2021 г. составило 37,4%), то Ставропольский край (164,7%) и Ростовская область (223,0%) находятся по этому показателю в лидерах России. Поскольку в основном производство электроэнергии осуществляется на ТЭЦ (или АЭС – в Ростовской области), то косвенно данный показатель отражает не только баланс электроэнергии, но и тепловой энергии в централизованном энергоснабжении. Однако, практически во всех сельскохозяйственных регионах России в большей или меньшей степени стоит проблема низкой доступности к объектам энергетической инфраструктуры. В частности, менее 40% крупных и средних сельскохозяйственных производителей имеют доступ к сетевому газу.

Использование агробиомассы наиболее оптимально для энергообеспечения собственных нужд предприятий или локальных потребителей в непосредственной близости к источникам ресурсов, поэтому оценки были проведены с детализацией до уровня муниципалитетов. Низкий КПД преобразования энергии отходов в электроэнергию за-

ставляет рассматривать только потенциал замещения энергией отходов теплотребления и горячего водоснабжения в жилом секторе. Промышленные предприятия в связи с нерентабельностью транспортировки отходов на значительные расстояния в качестве потребителей не рассматривались.

Поскольку статистические данные о потреблении тепловой энергии, особенно на уровне муниципалитетов, весьма ограниченно представлены в открытом доступе, в работе была использована упрощенная методика оценки потребления энергии в зданиях и сооружениях на основе СНиП «Тепловая защита зданий» [Тепловая защита..., 2004]. Удельное (на единицу жилой площади) потребление тепловой энергии складывается из отопления, горячего водоснабжения и компенсации потерь тепла на вентиляцию. На основе рассчитанной величины градусо-суток отопительного периода (ГСОП) и среднего приведенного коэффициента теплопередачи для единицы площади совокупной ограждающей поверхности зданий ( $0,55 \text{ Вт/м}^2$ ) определялась потребляемая тепловая энергия на отопление [Энергетика..., 2011; Гашо, 2016]. При оценке суммарной площади ограждающих поверхностей жилых помещений были использованы региональные данные о численности городского и сельского населения в рассматриваемых субъектах, нормах жилой площади и доли централизованно отапливаемых площадей [База данных..., 2023].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Суммарные потенциалы производства тепловой энергии из отходов трех основных видов сельскохозяйственных культур в Краснодарском крае и Ростовской области близки по величине и приблизительно в два раза превышают потенциал отходов Ставропольского края (табл. 2). При этом соотношение вклада отходов отдельных культур в возможное производство тепла различно. В Краснодарском крае из соломы зерновых можно получить в два раза больше тепловой энергии, чем из отходов кукурузы, и в 1,5 раза больше, чем из отходов подсолнечника. В Ростовской области максимальным тепловым потенциалом обладают отходы подсолнечника, энергетическое содержание которых по теплу превосходит таковое от соломы на 16% и почти в семь раз превышает возможность получения тепла от кукурузных остатков. В Ставропольском крае также наибольшим потенциалом производства тепловой энергии обладают отходы зерновых (солома), которые в два раза выше потенциала отходов подсолнечника и приблизительно в четыре раза выше кукурузы. Это различие в абсолютных значениях и структуре потенциалов производства тепло-

вой энергии определяется объемами и структурой отходов и, в конечном счете, посевными площадями и урожайностью этих культур в рассмотренных регионах.

Результаты оценки потенциала производства тепловой энергии из отходов растениеводства для муниципальных образований исследуемых субъектов представлены на рис. 1–3. Определены муниципальные районы с потенциалом производства те-

пловой энергии более 4,2 млн ГДж/год (1 млн ГКал) в Краснодарском крае (Ейский, Каневский, Кореновский, Кушевский, Ленинградский, Новокубанский, Новопокровский, Павловский, Тихорецкий), в Ростовской области (Азовский, Егорлыкский, Зерноградский, Кашарский, Матвеево-Курганский, Миллеровский, Неклиновский, Целинский) и в Ставропольском крае (Красногвардейский, Ипатовский и Новоалександровский).

Таблица 2

**Суммарный валовый и технический потенциалы отходов производства зерновых, подсолнечника и кукурузы в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях (по данным на 2019 г.)**  
[Валовый сбор..., 2023]

| Субъект РФ          | Валовый потенциал, млн т у. т./год |          |              |       | Технический потенциал (тепловая энергия) (млн ГДж/год) |          |              |        | Отношение технического к валовому |
|---------------------|------------------------------------|----------|--------------|-------|--------------------------------------------------------|----------|--------------|--------|-----------------------------------|
|                     | Солома                             | Кукуруза | Подсолнечник | Сумма | Солома                                                 | Кукуруза | Подсолнечник | Сумма  |                                   |
| Краснодарский край  | 5,9                                | 1,4      | 2,0          | 9,3   | 59,64                                                  | 28,56    | 39,48        | 127,68 | 0,47                              |
| Ростовская область  | 5,1                                | 0,4      | 3,0          | 8,6   | 51,66                                                  | 8,82     | 61,74        | 122,22 | 0,48                              |
| Ставропольский край | 3,6                                | 0,4      | 0,8          | 4,8   | 36,54                                                  | 7,98     | 16,8         | 61,32  | 0,43                              |

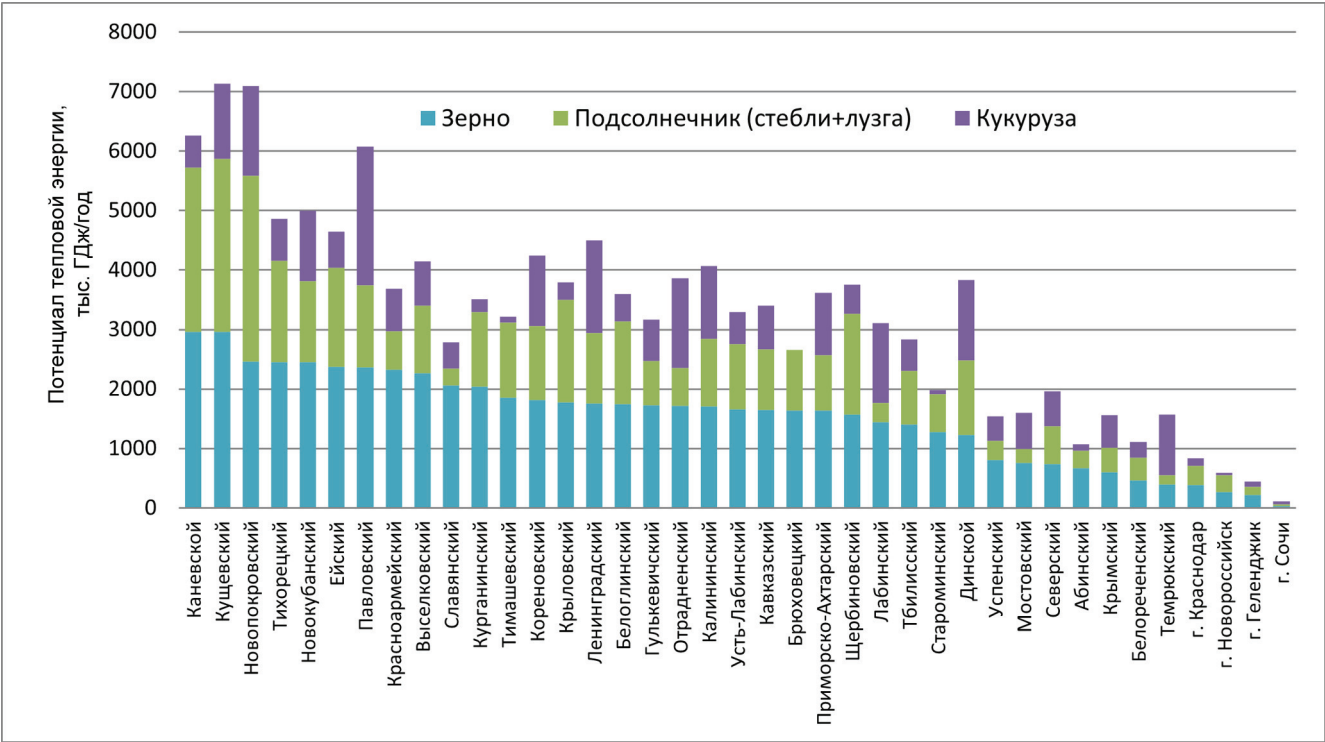


Рис. 1. Технический потенциал производства тепловой энергии из отходов растениеводства по данным 2019 г. для муниципальных образований Краснодарского края

Fig. 1. Technical potential for the production of thermal energy from crop waste according to 2019 data for the municipalities of the Krasnodar region

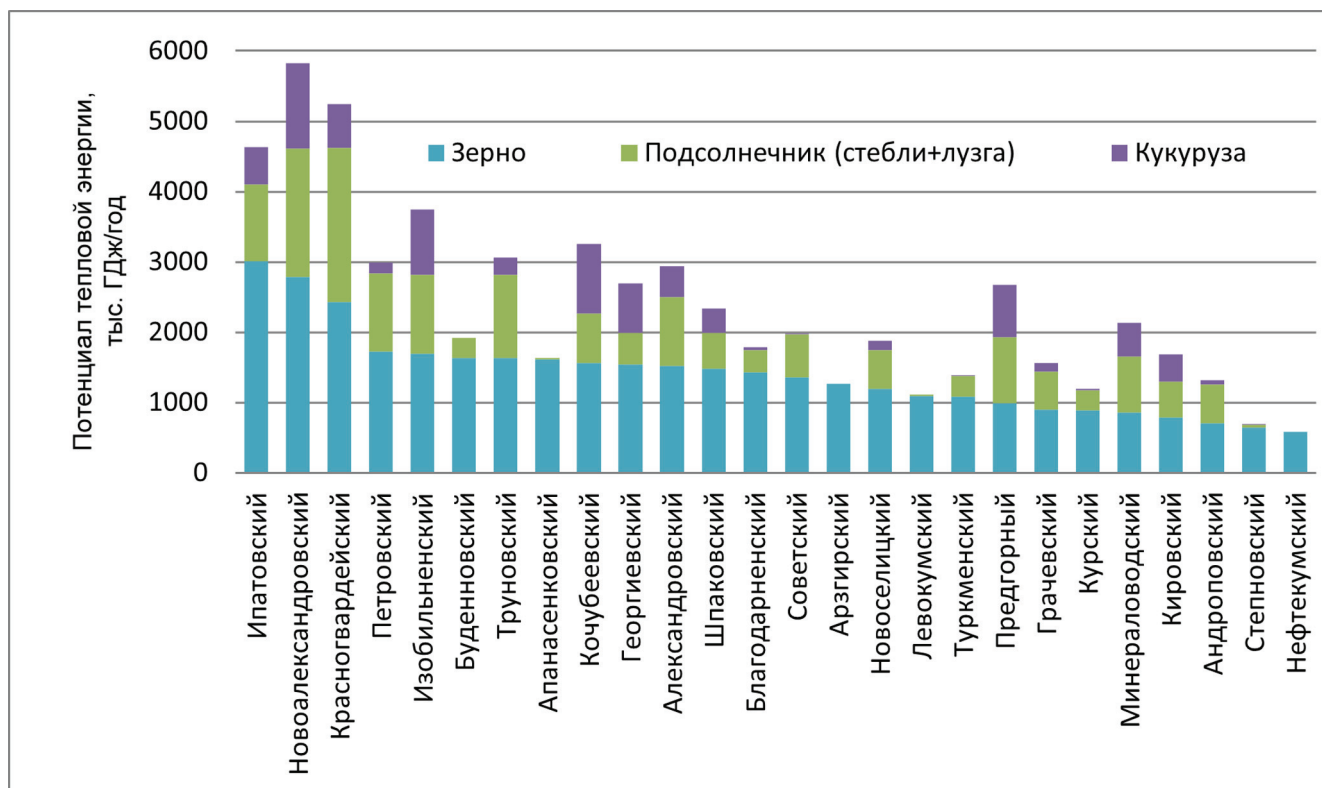


Рис. 2. Технический потенциал производства тепловой энергии из отходов растениеводства по данным 2019 г. для муниципальных образований Ставропольского края

Fig. 2. Technical potential for the production of thermal energy from crop waste according to 2019 data for the municipalities of the Stavropol' region

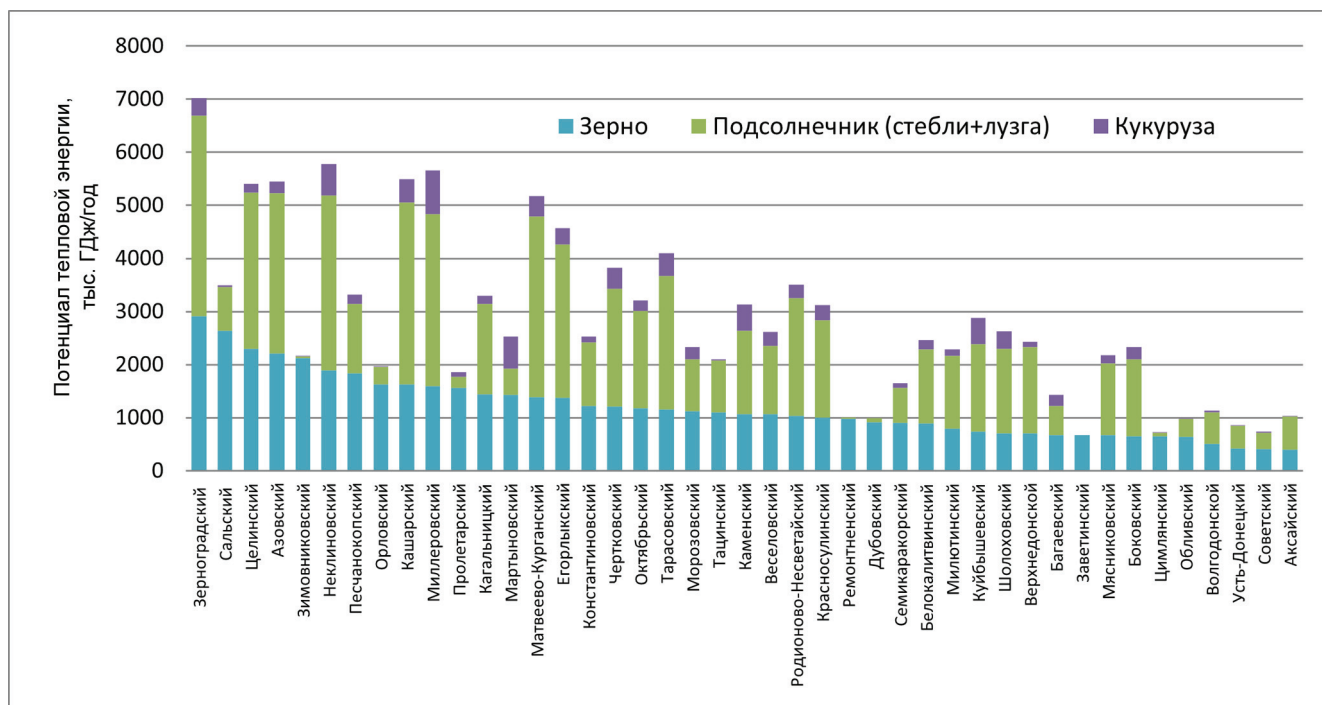


Рис. 3. Технический потенциал производства тепловой энергии из отходов растениеводства по данным 2019 г. для муниципальных образований Ростовской области

Fig. 3. Technical potential for the production of thermal energy from crop waste according to 2019 data for the municipalities of the Rostov region



Видно, что, за исключением Ростовской области, в большинстве районов преобладающим источником отходов являются зерновые культуры. В ряде муниципальных районов солома – абсолютно доминирующий вид отходов (например, Красноармейский, Курганинский районы Краснодарского края, Ипатовский район Ставропольского края) или даже единственный (в Ставропольском крае – Апанасенковский, Арзгирский, Левокумский, Степновский, Нефтекумский районы; в Ростовской области – Зимовниковский, Ремонтненский, Дубовский, Заветинский, Цимлянский). В большинстве районов Ростовской области с соломой конкурируют отходы подсолнечника. Такая специфика распределения ресурсного потенциала и его структуры может существенно влиять на дальнейший анализ экономических факторов, связанных с технологиями переработки того или иного вида отходов в энергию, а также с моделированием логистических цепочек от сбора отходов на полях до места их переработки.

Для оценки значимости технического потенциала производства тепловой энергии из сельскохозяйственных отходов для каждого субъекта были рассчитаны потребление тепловой энергии за отопительный сезон в жилищном секторе муниципалитетов на основе методики, описанной выше, а также доля покрытия тепловой нагрузки (потребления тепла) за счет использования сельскохозяйственных отходов – потенциал замещения (табл. 3). При этом в расчетах технического потенциала учтено использование соломы зерновых для других целей сельскохозяйственного производства (подстилочный материал в животноводстве, поддержание плодородия почвы и др.); в результате только половина валового энергопотенциала соломы учитывалась при расчетах производимой тепловой энергии. В связи со значительным опытом использования соломы для получения энергии, а также наличием, в том числе на российском рынке, готового оборудования, солома была далее рассмотрена как наиболее перспективный энергоноситель в рамках внутрорегионального анализа.

Таблица 3

**Потенциал замещения потребления тепловой энергии в жилом секторе регионов Юга России энергией отходов растениеводства**

| Регион              | Потребление тепла в жилищном секторе, млн ГДж/год | Технический потенциал производства тепловой энергии от отходов растениеводства, млн ГДж/год |                              |                                   | Доля покрытия потребления тепловой энергии в жилом секторе региона, % |                              |                                   |          |
|---------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|----------|
|                     |                                                   | Солома зерновых                                                                             | Отходы производства кукурузы | Отходы производства подсолнечника | Солома зерновых                                                       | Отходы производства кукурузы | Отходы производства подсолнечника | Суммарно |
| Краснодарский край  | 105,9                                             | 59,68                                                                                       | 28,73                        | 39,69                             | 56                                                                    | 27                           | 37                                | 120      |
| Ростовская область  | 76,86                                             | 52,58                                                                                       | 8,99                         | 61,78                             | 68                                                                    | 12                           | 81                                | 160      |
| Ставропольский край | 49,52                                             | 36,41                                                                                       | 8,11                         | 16,97                             | 74                                                                    | 16                           | 34                                | 124      |

Анализ пространственного распределения результатов на рис. 4–6 позволяет определить наиболее перспективные районы, которые одновременно обладают высоким энергопотенциалом (выше среднего по всем регионам, который составляет более 1680 тыс. ГДж/год), способным покрывать теплоснабжение в жилом секторе (доля замещения больше 1). В Краснодарском крае это девять районов. Ростовская область характеризуется чуть более низкими значениями технического энергопотенциала отходов зерновых, но при этом более высоким числом районов с долей покрытия нагрузки теплоснабжения более 100%. В этом субъекте наиболее пер-

спективными являются районы, граничащие друг с другом и расположенные в южной части области. В Ставропольском крае энергопотенциал отходов зерновых более низкий, высокие значения имеют только пять районов. Тем не менее многие районы края способны покрыть потребности в теплоснабжении за счет этих отходов вследствие более низкой численности населения (см. рис. 6). Важно, что муниципальные районы с высокой долей покрытия нагрузки потребления во всех трех субъектах граничат друг с другом, образуя территориальное «ядро» производителей зерновых и обладающих высоким энергопотенциалом отходов.

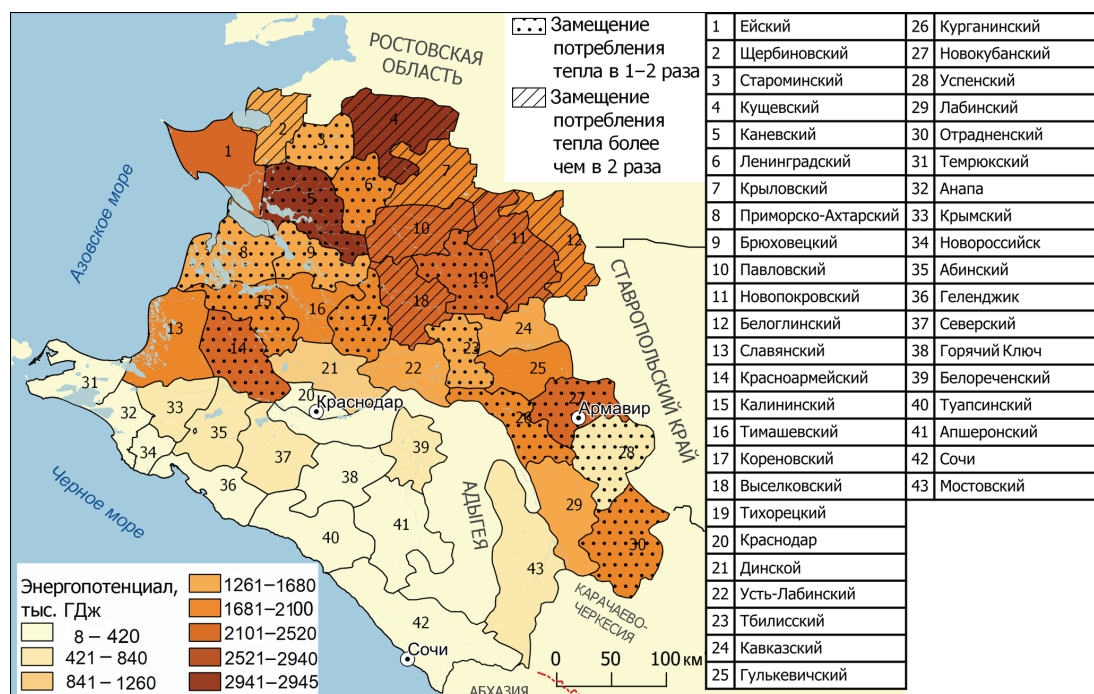


Рис. 4. Потенциал производства энергии из отходов зерновых (соломы) для муниципальных образований Краснодарского края

Fig. 4. Potential of energy production from grain waste (straw) for the municipal districts of the Krasnodar region

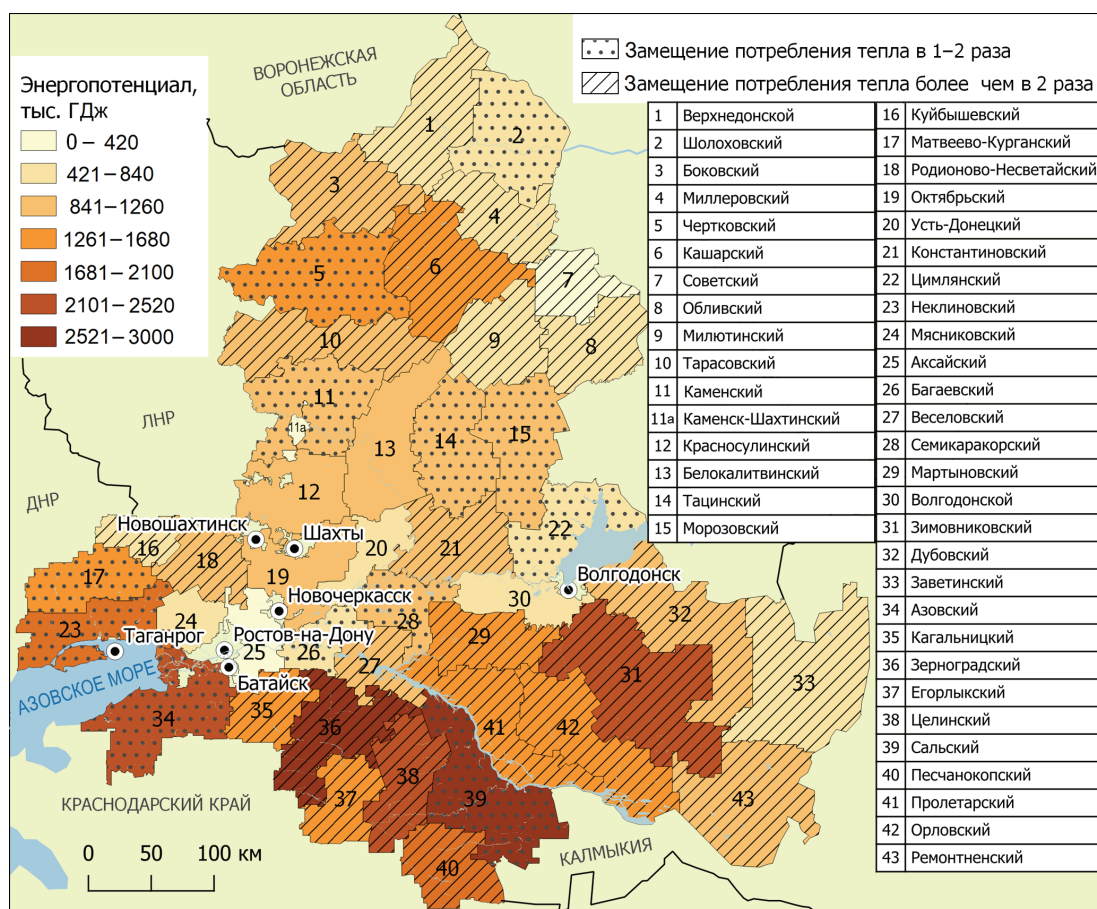


Рис. 5. Потенциал производства энергии из отходов зерновых (соломы) для муниципальных образований Ростовской области

Fig. 5. Potential for energy production from grain waste (straw) for the municipal districts of the Rostov region

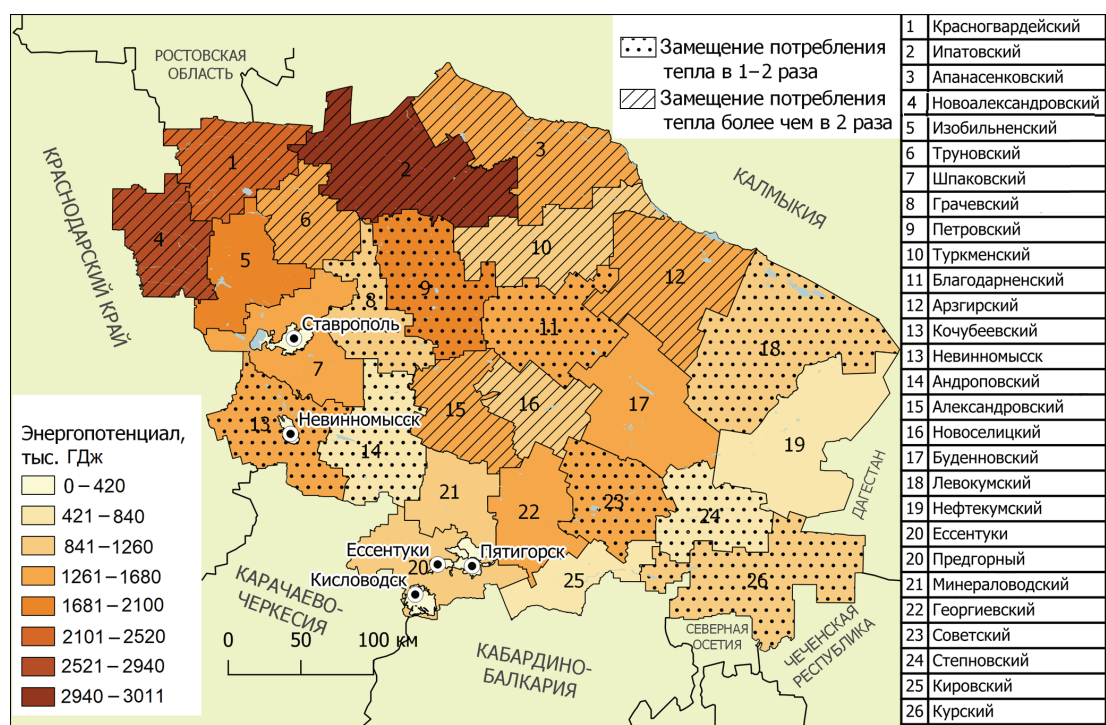


Рис. 6. Потенциал производства энергии из отходов зерновых (соломы) для муниципальных образований Ставропольского края

Fig. 6. Potential for energy production from grain waste (straw) for the municipal districts of the Stavropol region

Полученные оценки технического потенциала позволили выполнить кластерный анализ муниципальных образований по доле покрытия нагрузки или потенциалу замещения потребления тепловой энергии в жилом секторе за счет отходов зерновых (табл. 4). Под потенциалом замещения в данном случае подразумевается отношение тепловой энергии, которую возможно получить из соломы, к ежегодному потреблению этой энергии в жилом секторе. Кластеризация выполнялась методом *k*-средних по двум параметрам: доле покрытия нагрузки (потребления тепловой энергии в жилом секторе) и численности населения. Процедура позволила разделить муниципальные районы на четыре кластера (см. табл. 4).

Для более детального пространственного анализа результатов кластеризации была составлена комплексная карта (рис. 7). На карте обозначено ядро наиболее перспективных, граничащих друг с другом районов всех трех регионов с высоким уровнем обеспеченности отходами зерновых с численностью населения от 6200 до 72 000 чел. (кластер 4) и отдельные районы с более высокой численностью населения 80 000–147 000 чел. (кластер 3). Районы кластера 2 с недостаточными ресурсами соломы для обеспечения собственных нужд теплоснабжения в пространственном отношении расположены довольно разрозненно. Их перспективность с точки

зрения использования отходов соломы как энергетического ресурса может существенно зависеть от анализа экономических параметров и возможности транспортировки отходов того же вида из близлежащих районов с избыточным потенциалом. К таким территориям – «реципиентам» топливных ресурсов в Ростовской области можно отнести Волгоградской район (собственные возможности замещения потребления тепла энергией из местных отходов зерновых в этом районе 0,9), а также север Белокалитвинского района (0,6).

В Краснодарском крае для Ейского района (0,93) потенциальным (и единственным) «донором» отходов может являться Щербиновский район (2,58). Кавказский (0,71) и Гулькевичский (0,94) районы могут рассматривать возможности доставки соломы из Новопокровского (3,36) и Белоглинского районов (3,33) Краснодарского края и Новоалександровского (2,52) района Ставропольского края. Буденновский район (0,81) Ставропольского края может быть потенциально обеспечен ресурсами соломы за счет доставки недостающих объемов топлива из Арзгирского (3,32). В целом проведенный анализ подтверждает, что солома в исследованных регионах может представлять интерес именно как местный ресурс для целей энергообеспечения населения преимущественно сельских территорий.



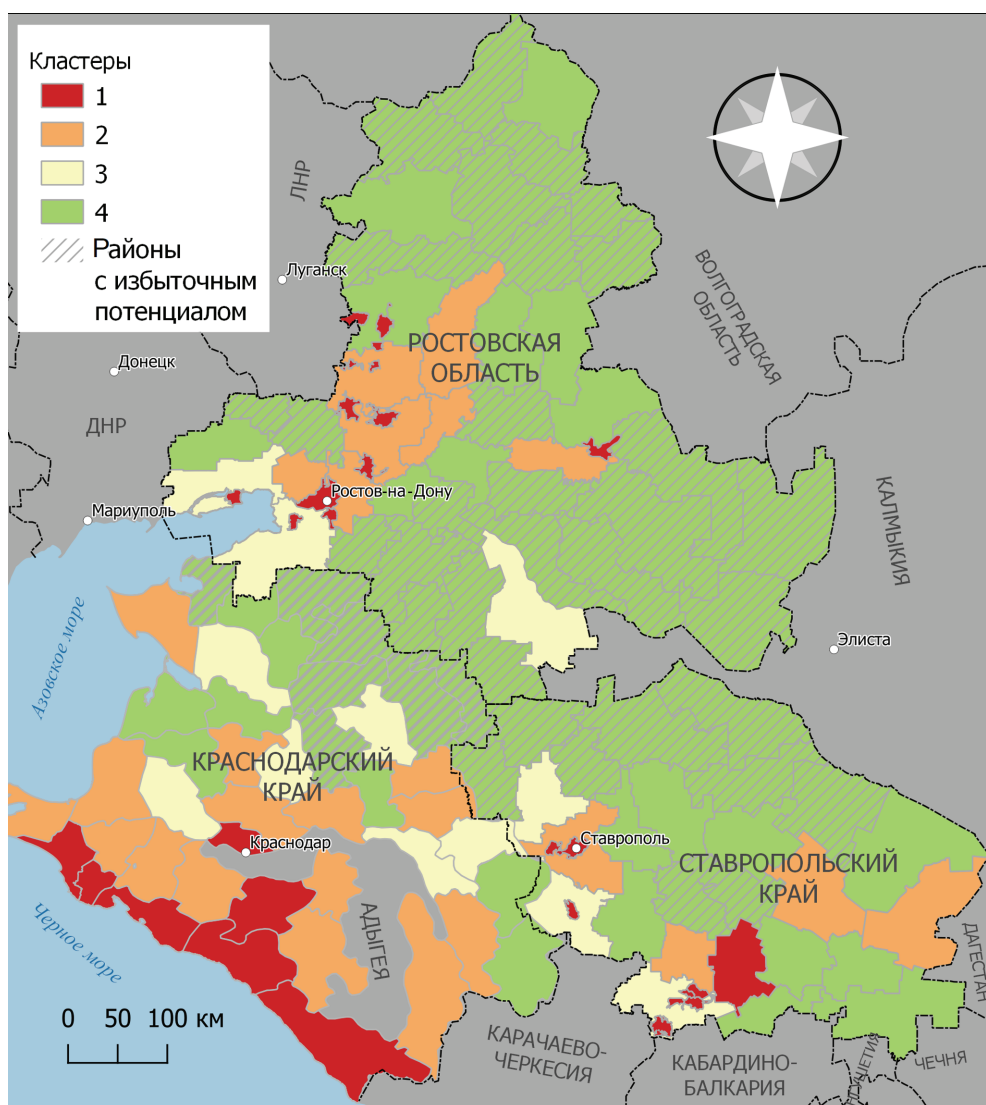


Рис. 7. Пространственное распределение потенциала энергозамещения (тепловая энергия) за счет использования отходов зерновых для Краснодарского края, Ростовской области и Ставропольского края

Fig. 7. Spatial distribution of alternative energy potential (thermal energy) through the use of grain waste for the Krasnodar, Rostov and Stavropol regions

### ВЫВОДЫ

Отходы растениеводства все в большей степени привлекают внимание к использованию в целях энергоснабжения во многих регионах мира. Для оценки ресурсов и энергопотенциалов разработаны и используются общие методологические подходы, которые учитывают урожайность, долю отходов и их энергосодержание в привязке к типу сельскохозяйственных культур и местных условий.

В России для энергоснабжения используется в основном древесная биомасса (как в виде древесного топлива – пеллет и брикетов, так и в виде лесосечных отходов – щепы, опилок). Однако в силу растущих объемов сельскохозяйственного производства и необходимости оптимальной утилизации значительного количества отходов актуальными

(и в ряде случаев реализованными) являются проекты энергоснабжения на основе топлива из отходов различных отраслей растениеводства – в основном для производства тепла.

Наибольшими объемами производства зерновых, подсолнечника и кукурузы характеризуются Краснодарский и Ставропольский края и Ростовская область, где суммарный технический энергопотенциал отходов этих культур достигает в максимуме (Краснодарский край) 128,1 млн ГДж/год. Наибольшим потенциалом замещения потребностей регионов в теплоснабжении жилого сектора за счет отходов растениеводства характеризуется Ростовская область (160%). При этом во всех исследованных регионах основным ресурсом для производства энергии можно рассматривать отходы зерновых (солому).

## Результаты кластеризации районов Ростовской области, Краснодарского и Ставропольского краев

|                                                                                                             | Краснодарский край                                                                                                                                                                                                               | Ставропольский край                                                                                                                                                                                                                                                                | Ростовская область                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Примечание                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Кластер 1:<br>население – более<br>165 000 человек; по-<br>тенциал замещения<br>потребления тепла – 0       | Краснодар, Новоросийск,<br>Сочи, Армавир, Анапа,<br>Туапсинский, Геленджик,<br>Горячий Ключ                                                                                                                                      | Ростов-на-Дону, Волгодонск,<br>Новочеркасск, Таганрог, Шахты,<br>Азов, Багайск, Каменск-<br>Шахтинский, Новошахтинск,<br>Гуково, Донецк, Зверево                                                                                                                                   | Ставрополь, Пятигорск, Железноводск,<br>Лермонтов, Георгиевский, Ессентуки,<br>Кисловодск, Невинномысск                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Энергия из соломы<br>не способна покрыть<br>потребности жилого<br>сектора                                                                                             |
| Кластер 2:<br>население – 6200–<br>147 000 человек; по-<br>тенциал замещения по-<br>требления тепла – 0–1   | Абинский, Апшеронский,<br>Белореченский, Гулькевичский,<br>Динской, Ейский, Кавказский,<br>Крымский, Лабинский,<br>Мостовский, Северский,<br>Славянский, Темрюкский,<br>Тимашевский, Усть-Лабинский                              | Буденновский, Шпаковский,<br>Минераловодский,<br>Нефтекумский                                                                                                                                                                                                                      | Аксайский, Белокалитвинский,<br>Волгодонской, Красносулинский,<br>Мясниковский, Октябрьский,<br>Усть-Донецкий, Целинский                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Энергия из соло-<br>мы может служить<br>дополнительным<br>топливным ресур-<br>сом для отдельных<br>территорий внутри<br>районов                                       |
| Кластер 3:<br>население – 80 000–<br>147 000 человек; по-<br>тенциал замещения по-<br>требления тепла – 1–2 | Каневской, Кореновский,<br>Красноармейский,<br>Курганинский, Новокубанский,<br>Тихорецкий                                                                                                                                        | Кочубеевский, Предгорный,<br>Изобильненский                                                                                                                                                                                                                                        | Азовский, Неклиновский, Сальский                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Избыточный энерго-<br>потенциал соломы                                                                                                                                |
| Кластер 4:<br>население 6200–72 000<br>человек; потенциал за-<br>мещения потребления<br>тепла – более 1     | Белоглинский, Брюховецкий,<br>Выселковский, Калининский,<br>Крыловский, Кушевский,<br>Ленинградский, Новопокровский,<br>Отраденский, Павловский,<br>Приморско-Ахтарский,<br>Староминский, Тбилисский,<br>Успенский, Щербиновский | Александровский,<br>Апанасенковский, Арзгирский,<br>Грачевский, Красногвардейский,<br>Андроповский, Курский,<br>Левокумский, Новоселицкий,<br>Степновский, Труновский,<br>Туркменский, Благодарненский,<br>Ипатовский, Кировский,<br>Новоалександровский,<br>Петровский, Советский | Багаевский, Боковский, Верхнедонской,<br>Веселовский, Дубовский,<br>Егорлыкский, Заветинский,<br>Зерноградский, Зимовниковский,<br>Кагальницкий, Каменский, Кашарский,<br>Константиновский, Куйбышевский,<br>Мартыновский, Матвеево-Курганский,<br>Миллеровский, Милотинский,<br>Морозовский, Обливский, Орловский,<br>Песчаноконский, Пролетарский,<br>Ремонтненский, Родионово-Несветайский,<br>Семикаракорский, Советский,<br>Тарасовский, Тащинский, Цимлянский,<br>Чертковский, Шолоховский | Могут не только обе-<br>спечивать энергией<br>из соломы собствен-<br>ные нужды, но и<br>являются потенци-<br>альными донорами<br>топлива для близле-<br>жащих районов |

Расчеты и анализ энергопотенциала отходов трех видов сельскохозяйственных культур (зерновых, подсолнечника, кукурузы) на внутрирегиональном уровне позволили выявить районы с высоким потенциалом производства тепловой энергии – более 4,2 млн ГДж/год. Так, в Краснодарском крае это пороговое значение превышено в девяти районах, в Ростовской области – в восьми, в Ставропольском крае – в трех. Наиболее перспективными с точки зрения использования отходов зерновых в производстве энергии предложено считать муниципальные районы с высоким энергопотенциалом и долей покрытия тепловой нагрузки в жилом секторе (потенциалом замещения) более 1.

Кластеризация исследуемых районов методом *k*-средних позволила выделить четыре кластера: 1) районы с высокой численностью населения (более 165 000 чел.), где потенциал замещения тепловой энергией близок к 0; 2) районы с численностью населения 6200–147 000 чел. и потенциалом замещения 0–1, которые могут рассматриваться как потенциально перспективные при возможности транспортировки дополнительных ресурсов соломы из соседних районов-доноров; 3) районы с численностью населения 80 000–147 000 чел. и потенциалом покрытия потребностей жилого сектора 1–2; 4) районы с численностью населения 6200–72 000 чел. и избыточными отходами соломы, которые могут рассматриваться как районы-доноры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / Т.И. Андреев и др. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 160 с.
- Клюс С.В., Забарный Г.Н. Оценка и прогноз потенциала твердого биотоплива Украины // Коллекторное и энергетическое машиностроение. 2011. № 2(24). С. 8–13.
- Передерий С. Солома для денег или деньги из соломы. Производство и сжигание гранулированных отходов растениеводства // ЛесПромИнформ. 2010. № 4(70). С. 148–150.
- Ракитова О.С. Каким быть топливу будущего // ЛесПромИнформ. 2021. № 3(157). С. 116–121.
- Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива / под ред. П.П. Безруких. М.: ИАЦ Энергия, 2007. 272 с.
- Тепловая защита зданий. СНиП 23-02-2003. М.: Государственный комитет РФ по строительству и жилищно-коммунальному комплексу, 2004. 26 с.
- Энергетика в современном мире / В.Е. Фортов, О.С. Попель. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2011. 167 с.
- Ryan P., Openshaw K. Assessment of biomass energy resources – a discussion on its need and methodology, D.C.: World Bank Group Industry and Energy Department, 1991.
- Bentsen N.S., Felby C. Biomass for energy in the European Union – a review of bioenergy resource assessments, *Biotechnology for Biofuels*, 2012, vol. 5, no. 25, DOI: 10.1186/1754-6834-5-25.
- Fraia S.D., Fabozzi S., Macaluso A., Vanoli L. Energy potential of residual biomass from agro-industry in a Mediterranean region of southern Italy (Campania), *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 277, no. 124085, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124085.
- Berndes G., Hoogwijk M., Broek van den R. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, *Biomass and Bioenergy*, 2003, vol. 25, iss. 1, p. 1–28, DOI: 10.1016/S0961-9534(02)00185-X.
- Guler D., Battenfield B.P., Charisoulis G., Yomralioglu T. Comparative analysis of bioenergy potential and suitability modeling in the USA and Turkey, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 53, part C, 10262, DOI: 10.1016/j.seta.2022.102626.
- Guo H., Cui J., Li J. Biomass power generation in China: Status, policies and recommendations, *Energy Reports*, 2022, no. 8(13), p. 687–696.
- Karan S.K., Hamelin L. Crop residues may be a key feedstock to bioeconomy but how reliable are current estimation methods? *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 164, 105211, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105211.
- Kpalo S.Y., Zainuddin M.F., Manaf L.A. et al. Techno-Economic Viability Assessment of a Household Scale Agricultural Residue Composite Briquette Project for Rural Communities in Nigeria, *Sustainability*, 2022, vol. 14, 9399, DOI: 10.3390/su14159399.
- Bilandzija N., Voca N., Jelcic B. et al. Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 93, p. 225–230, DOI: 10.5937/JPEA1701032B.
- Ruiz P., Nijis W., Tarydas D. et al. ENSPRESO an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials, *Energy Strategy Reviews*, 2019, vol. 26, 100379, DOI: 10.1016/j.esr.2019.100379.
- Offermann R., Seidenberger T., Thrän D. et al. Assessment of global bioenergy potentials, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2011, vol. 16, p. 103–115, DOI: 10.1186/1754-6834-5-25.
- Sliz-Szkliniarz B., Vogt J. A GIS-based approach for evaluating the potential of biogas production from livestock manure and crops at a regional scale: A case study for the Kujawsko-Pomorskie Voivodeship, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, p. 752–763.
- Somerville C. The billion-ton biofuels vision, *Science*, 2006, vol. 312(5778), 1277, DOI: 10.1126/science.1130034.
- Jolli D., Giljum S. Unused biomass extraction in agriculture, forestry and fishery, Sustainable Europe Research Institute (SERI), 2005, no. 3, 40 p.
- Электронные ресурсы  
База данных показателей муниципальных образований // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst> (дата обращения 01.03.2023).



- Валовый сбор сельскохозяйственных культур // Единая межведомственная информационно-статистическая система. URL: <https://fedstat.ru/indicator/30950> (дата обращения 01.03.2023).
- Валовой сбор сельскохозяйственных культур по категориям хозяйств в хозяйствах всех категорий / Единая межведомственная информационно-статистическая система. 2022. URL: <https://fedstat.ru/indicator/30950> (дата обращения 28.02.2023).
- Володарец И.В. Энергия биомассы. Энергетическая утилизация отходов агропереработки. 2021. URL: <https://1-engineer.ru/energeticheskaya-utilizaciya-othodov-agropererabotki/> (дата обращения 28.02.2023).
- Гашио Е.Г. Выявление и реализации резервов повышения эффективности систем теплоэнергоснабжения городов и регионов: URL: [https://mpei.ru/Structure/Universe/peep/structure/hamepai/enmie/Documents/konferense\\_2016/Gashio.pdf](https://mpei.ru/Structure/Universe/peep/structure/hamepai/enmie/Documents/konferense_2016/Gashio.pdf) (дата обращения 01.03.2023).
- Площади многолетних насаждений в Российской Федерации // Федеральная служба государственной статистики. URL: [https://rosstat.gov.ru/enterprise\\_economy](https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy) (дата обращения 28.02.2023).
- Danish energy sector: TPES and features of bioenergy development, URL: <https://uabio.org/en/materials/12037/> (дата обращения 28.02.2023).
- Koppejan J. Agricultural and forest residues – generation, utilization and availability, Paper presented at the regional consultation on modern applications of biomass energy, 1997, Kuala Lumpur, Malaysia, URL: [https://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/p\\_residues.pdf](https://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/p_residues.pdf) (дата обращения 28.02.2023).
- REN21 Global Status Report, 2022, URL: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf#page=101&zoom=100,0,0](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf#page=101&zoom=100,0,0) (дата обращения 28.02.2023).

Поступила в редакцию 27.08.2022

После доработки 25.03.2023

Принята к публикации 27.07.2023

## ENERGY POTENTIAL OF AGROBIOMASS IN KRASNODAR, STAVROPOL AND ROSTOV REGIONS

T.I. Andreenko<sup>1</sup>, S.V. Kiseleva<sup>2</sup>, Yu.Yu. Rafikova<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Renewable Energy Sources*

<sup>1</sup> *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: tanyandr00@mail.ru*

<sup>2</sup> *Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: k\_sophia\_v@mail.ru*

<sup>3</sup> *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ju.rafikova@mail.ru*

At present the use of organic waste for energy production has become a significant part of the world energy industry. Thereby both the problem of energy supply and waste disposal are solved. In connection with the large volumes of annually formed resource, the ability to provide inexpensive logistics and the demand for energy at the level of local consumption the task of recycling agricultural waste is of particular interest. The paper presents a methodology for assessing the crop waste energy potential, taking into account the type of crops, the energy content and specific features of their processing to produce thermal energy. The regions of the Russian Federation leading in the production of cereals, sunflower and corn, i. e. Stavropol Territory, Krasnodar Territory and Rostov Region, were chosen as study areas, both due to the significant energy potential and the available experience of producing energy from wastes in the South of Russia. The quantities of thermal energy that can be obtained from the waste of these crops are determined (the totals for all crops are 14 600 000, 30 500 000 and 29 100 000 million Gcal/year for the regions, respectively), as well as the share of heat supply coverage in the residential sector of the regions (124, 120 and 160%, respectively). The cluster analysis methods allowed identifying groups of districts that are self-sufficient in terms of the local energy resource, as well as potential “donors” of fuel from waste. The results are displayed on charts and a series of maps.

**Keywords:** bioenergy, agricultural waste, resources, energy supply potential

## REFERENCES

- Assessment of biomass energy resources – a discussion on its need and methodology*, P. Ryan, K. Openshaw, D.C., World Bank Group Industry and Energy Department, 1991.
- Atlas resursov vozobnovlyаемой энергии na territorii Rossii: nauch. izdanie* [Atlas of Renewable Energy Resources in Russia: scientific edition], T.I. Andreenko et al., Moscow, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia Publ., 2015, 160 p. (In Russian)
- Bentsen N.S., Felby C. Biomass for energy in the European Union – a review of bioenergy resource assessments, *Biotechnology for Biofuels*, 2012, vol. 5, no. 25, DOI: 10.1186/1754-6834-5-25.
- Energetika v sovremenном mire* [Energy in the modern world], V.E. Fortov, O.S. Popel'. Dolgoprudnyi, Intellect Publ., 2011, 167 p. (In Russian)

- Fraia S.D., Fabozzi S., Macaluso A., Vanoli L. Energy potential of residual biomass from agro-industry in a Mediterranean region of southern Italy (Campania), *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 277, no. 124085, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124085.
- Berndes G., Hoogwijk M., Broek van den R. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, *Biomass and Bioenergy*, 2003, vol. 25, iss. 1, p. 1–28, DOI: 10.1016/S0961-9534(02)00185-X.
- Guler D., Battenfield B.P., Charisoulis G., Yomralioglu T. Comparative analysis of bioenergy potential and suitability modeling in the USA and Turkey, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 53, part C, 10262, DOI: 10.1016/j.seta.2022.102626.
- Guo H., Cui J., Li J. Biomass power generation in China: Status, policies and recommendations, *Energy Reports*, 2022, no. 8(13), p. 687–696.
- Karan S.K., Hamelin L. Crop residues may be a key feedstock to bioeconomy but how reliable are current estimation methods? *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 164, 105211, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105211.
- Klyus S.V., Zabarnyi G.N. Otsenka i prognoz potentsiala tverdogo biotopliva Ukrainy [Assessment and forecast of the potential of solid biofuels in Ukraine], *Kollektor-noe i energeticheskoe mashinostroenie*, 2011, no. 2(24), p. 8–13. (In Russian)
- Kpalo S.Y., Zainuddin M.F., Manaf L.A. et al. Techno-Economic Viability Assessment of a Household Scale Agricultural Residue Composite Briquette Project for Rural Communities in Nigeria, *Sustainability*, 2022, vol. 14, 9399, DOI: 10.3390/su14159399.
- Bilandzija N., Voca N., Jelcic B. et al. Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 93, p. 225–230, DOI: 10.5937/JPEA1701032B.
- Offermann R., Seidenberger T., Thrän D. et al. Assessment of global bioenergy potentials, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2011, vol. 16, p. 103–115, DOI: 10.1186/1754-6834-5-25.
- Perederii S. Soloma dlya deneg ili den'gi iz solomy. Proizvodstvo i szhiganiye granulirovannykh otkhodov rasteniyevodstva [Straw for money or money from straw. Production and incineration of granulated crop waste], *LesPromInform*, 2010, no. 4(70), p. 148–150. (In Russian)
- Rakitova O.S. Kakim byt' toplivu budushchego [What will be the fuel of the future], *LesPromInform*, 2021, no. 3(157), p. 116–121. (In Russian)
- Ruiz P., Nijs W., Tarvydas D. et al. ENSPRESO an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials, *Energy Strategy Reviews*, 2019, vol. 26, 100379, DOI: 10.1016/j.esr.2019.100379.
- Sliz-Szkliniarz B., Vogt J. A GIS-based approach for evaluating the potential of biogas production from livestock manure and crops at a regional scale: A case study for the Kujawsko-Pomorskie Voivodeship, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, p. 752–763.
- Somerville C. The billion-ton biofuels vision, *Science*, 2006, vol. 312(5778), no. 1277, DOI: 10.1126/science.1130034.
- Spravochnik po resursam vozobnovlyаемых istochnikov energii Rossii i mestnym vidam topliva* [Guide to Russia's Renewable Energy Resources and Local Fuels], Bezrukih P.P. et al. Moscow, Publishing and Analytical Center "Energiya", 2007, 272 p. (In Russian)
- Teplovaya zashchita zdaniy. SNiP 23-02-2003* [Thermal protection of buildings. Code of Norms and Rules 23-02-2003], Moscow, State Committee of the Russian Federation for Construction and Housing and Communal Complex, 2004, 26 p. (In Russian)
- Unused biomass extraction in agriculture, forestry and fishery*, Jolli D., Giljum S., Sustainable Europe Research Institute (SERI), 2005, 40 p.
- Web sources**
- Baza dannykh pokazatelei munitsipal'nykh obrazovaniy, Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki [Database of indicators of municipalities, Federal State Statistics Service], URL: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst> (access date 01.03.2023).
- Danish energy sector: TPES and features of bioenergy development, URL: <https://uabio.org/en/materials/12037/> (access date 28.02.2023).
- Gasho E.G. Vyyavlenie i realizatsii rezervov povysheniya effektivnosti sistem teploenergostonabzheniya gorodov i regionov [Identification and implementation of reserves to improve the efficiency of heat and power supply systems of cities and regions], URL: [https://mpei.ru/Structure/Universe/peep/structure/hamepai/enmie/Documents/konferense\\_2016/Gasho.pdf](https://mpei.ru/Structure/Universe/peep/structure/hamepai/enmie/Documents/konferense_2016/Gasho.pdf) (access date 01.03.2023).
- Koppejan J. Agricultural and forest residues – generation, utilization and availability, Paper presented at the regional consultation on modern applications of biomass energy, 1997, Kuala Lumpur, Malaysia, URL: [https://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/p\\_residues.pdf](https://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/p_residues.pdf) (access date 28.02.2023).
- Plushchadi mnogoletnikh nasazhdeniy v Rossiiskoi Federatsii, Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki [Areas of perennial plantations in the Russian Federation, Federal State Statistics Service], URL: [https://rosstat.gov.ru/enterprise\\_economy](https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy) (access date 28.02.2023).
- REN21 Global Status Report, 2022, URL: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf#page=101&zoom=100,0,0](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf#page=101&zoom=100,0,0) (access date 28.02.2023).
- Valovoi sbor sel'skokhozyaistvennykh kul'tur po kategoriyam khozyaistv v khozyaistvakh vsekh kategorii, Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya Sistema, 2022, [Gross harvest of agricultural crops, Unified interdepartmental information and statistical system], URL: <https://fedstat.ru/indicator/30950> (access date 28.02.2023).
- Valovyi sbor sel'skokhozyaistvennykh kul'tur, Edinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya Sistema, URL: <https://fedstat.ru/indicator/30950> (access date 01.03.2023).
- Volodarets I.V. Energiya biomassy. Energeticheskaya utilizatsiya otkhodov agropromyshlennosti [Biomass energy. Energy utilization of agricultural waste], 2021, URL: <https://1-engineer.ru/energeticheskaya-utilizatsiya-otkhodov-agropromyshlennosti/> (access date 28.02.2023).

Received 27.08.2022

Revised 25.03.2023

Accepted 27.07.2023

## ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 556.537.551.435.1

### ФОРМИРОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕНИЙ НА ИЗЛУЧИНАХ РУСЕЛ РЕК

Р.С. Чалов<sup>1</sup>, А.А. Камышев<sup>2</sup>, А.А. Куракова<sup>3</sup>, Г.Б. Голубцов<sup>4</sup>

<sup>1–4</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*

<sup>2–4</sup> *Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева*

<sup>1</sup> *Кафедра гидрологии суши, проф., д-р геогр. наук; e-mail: rschalov@mail.ru*

<sup>2</sup> *Мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: arsenii.kamyshev@yandex.ru*

<sup>3</sup> *Бед. инженер, канд. геогр. наук; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

<sup>4</sup> *Инженер, канд. геогр. наук; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru*

При изучении морфодинамики русел процессы и формы появления меандрирования и разветвления рассматриваются независимо друг от друга. Однако на больших реках развитие излучин осложняется формированием островов на их крыльях и в привершинных частях. Наиболее яркое проявление этого процесса – разветленно-извилистые русла, развитие которых происходит вследствие последовательного образования островов, создающих при причленении их к береговой пойме шпоры излучин. Рельеф пойм таких рек – ложбинно-островной (в отличие от гривистого рельефа типичных меандрирующих рек). Другой разновидностью таких русел больших рек являются чередующиеся односторонние разветвления, в которых излучины основного (многоводного) рукава огибают группы островов, расположенных в шахматном порядке, а само русло в пойменных берегах остается квазипрямолинейным (в разветвленно-извилистом русле оно образует сегментные излучины). Наличие разветвлений на излучине русла обуславливает рассредоточение стока, снижение водности основного рукава, что сказывается на параметрах излучин.

Острова формируются также в привершинных частях излучин, где вследствие нарушения условий безотрывного обтекания потоком берегов его динамическая ось смещается к выпуклому берегу, размывая его. В образующемся местном расширении русла возникает осередок и, при его зарастании, остров. На прямолинейных вставках между смежными большими излучинами местное расширение русла формируется при пересечении во время половодья пойменного и руслового потоков, и в нем также образуется осередок или остров. На верхних крыльях крутых излучин, особенно вынужденных, формирование разветвлений связано с подпором потока, возникающим при подходе его под большим углом к коренному берегу в вершине излучины.

Формирование разветвлений на излучинах русла следует учитывать при освоении рек как фактор, способный оказывать влияние на условия судоходства и влиять на особенности переформирования русла, что важно в местах пересечения рек линейными сооружениями (мостами и трубопроводами).

**Ключевые слова:** разветленно-извилистое русло, чередующиеся односторонние разветвления, острова, осередки, рассредоточение стока, местное расширение русла

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.6

#### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия (со второй половины XX в.) и в нашей стране, и за рубежом все больше внимания уделяется исследованиям русловых процессов на реках с разветвленным руслом. Однако обычно они рассматриваются при всем их многообразии в «чистом виде» – разветвлении как разновидности морфодинамических типов русел [Маккавеев, 1955; Ржаницын, 1985; Rosgen, 1994; Чалов, 2008]. При этом отмечается, что рукава разветвлений образуют излучины или также разделяются

островами меньших размеров на более короткие протоки [Чалов, 2021]. То же относится к процессам меандрирования, которые имеют намного более длительную историю исследований, начиная с первого десятилетия XX в., когда были сформулированы «законы Фарга» [Fargue, 1908]; осложнение излучин формированием островов при этом никем не рассматривалось [Schumm, 1977; Leopold, Wolman, 1960; Маккавеев, 1955; Розовский, 1957; Кондратьев, 1954; Попов, 1955; Гришанин, 1972] вплоть до начала XXI в.



Однако, как и во всех проявлениях природных процессов, морфодинамические типы речных русел не имеют жестких границ, и между ними существуют переходные (промежуточные) формы. Таковы, например, разветвленно-извилистые русла – специфический морфодинамический тип, объединяющий свойства, присущие как излучинам, так и разветвлениям. Они вошли в морфодинамическую классификацию речных русел МГУ [Чалов, 2008] как разновидность широкопойменных русел, разветвленных на рукава, но одновременно рассматриваются в качестве разновидностей речных излучин. Выделяются также чередующиеся односторонние разветвления, которые соотносятся как с разновидностями речных излучин [Чалов, 2008], так и с прибрежными односторонними разветвлениями.

Морфологические различия между этими двумя разновидностями разветвлений и неодинаковые условия их формирования обычно не принимаются во внимание, и они объединяются общим названием «разветвленно-извилистое русло», что неизбежно приводит к ошибкам при решении вопросов регулирования русел.

Кроме того, при изучении меандрирования особенно на больших реках не учитывается то, что излучины часто осложняются формированием разветвлений в их привершинных частях, на крыльях и на прямолинейных «вставках» между смежными излучинами и составными элементами (изгибами русла) сундучных (трапециевидных) излучин. Все это не только осложняет морфологию излучин русла, но и вносит существенные коррективы в режим их переформирования благодаря рассредоточению стока и наложению процессов меандрирования и разветвления.

Задача настоящей статьи – показать условия, морфологические различия, особенности формирования и многолетних деформаций разветвленно-извилистых русел, русел с чередующимися односторонними разветвлениями и разветвлений, образующихся на излучинах русла, дать их четкие определения и гидролого-морфологические характеристики, чтобы в дальнейшем избегать терминологической путаницы и оценивать их влияние на водохозяйственное и транспортное освоение рек.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу статьи положены материалы многолетних исследований русловых процессов на реках России и сопредельных стран, во время которых впервые было обращено внимание на существование переходных форм русел между разветвлениями и излучинами [Чалов, 2021], а впоследствии и на морфологические осложнения излучин русла разветвлениями на их элементах (на крыльях, в при-

вершинных частях), которые стали рассматриваться как формы второго или третьего порядков [Чалов, 2008]. При этом при крупномасштабных исследованиях выполнялся полный комплекс русловых изысканий (съемка и промеры русла, измерения расходов воды в рукавах и протоках, распределение руслообразующих наносов, скоростные поля и т. д.), причем со временем совершенствовались их технологии по мере применения все более современных приборов и аппаратуры. Так, например, скорости течения и расходы воды измерялись акустическим доплеровским измерителем скорости течения воды ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) типа RiverRay (погрешность определения расхода воды  $\leq 5\%$ ). Запись и обработка данных измерений ADCP осуществлялись с помощью компьютерной программы. Для руслового анализа использовались разновременные карты русел, составляемые на суходонные реки, аэро- и космические снимки, лоцманские карты (последние – за длительный период, начиная с 1960-х гг. и по настоящее время). Использование картографических материалов за разные годы помогает наиболее точно отследить морфодинамику русла, так как на них зафиксировано его состояние в определенный период времени. Исследования охватили большинство средних и больших рек России и сопредельных стран (Северную Двину и Вычегду, Обь и Иртыш, Лену и ее основные притоки, нижнюю Волгу и Оку, Днестр, Неман и многие другие).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология и деформации разветвленно-извилистых русел определяются формированием островов у выпуклых берегов излучин русла, составляющих шпоры последних. При этом линия размываемого берега характеризуется четко выраженной вогнутостью, ниже плеча которой, обычно совпадающего со створом перегиба между смежными излучинами, формируются острова, создающие в процессе развития шпору, а сами пойменные шпоры характеризуются ложбинно-островным рельефом, в котором основные элементы представлены грядами – бывшими островами и ложбинами – бывшими протоками [Чернов, 1983]. Этот тип русла характерен для нижней Вычегды (ниже устья р. Виледи), где ширина русла и параметры излучин (радиусы  $r$ , шаги  $L$ ) имеют наибольшие значения; выше по течению острова в извилистом русле отсутствуют [Чалов, 2021]. На нижнем Иртыше, Дону, Оке, верхней Оби (выше устья р. Томи) их или нет, или они встречаются в виде одиночных форм, не образуя морфологические однородные участки.

По мере развития излучин происходит заполнение наносами проток между островами, причленение островов к пойме и одновременное формирование новых островов на фоне увеличивающейся кривизны излучины (степени ее развитости  $l/L$ , где  $l$  – длина русла по излучине,  $L$  – ее шаг). При этом наличие островов в пределах извилистого русла является свидетельством наличия в потоке двух динамических осей, между которыми происходит накопление наносов и, как следствие, формирование осередков и островов. В качестве параметра, количественно отражающего кинематику структуры водного потока, следует рассматривать критерий И.Ф. Карасева ( $\Theta$ ) [Карасев, 1975]:

$$\Theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\frac{2g}{c^2}},$$

где  $b_p$  – ширина русла,  $h$  – глубина русла,  $g$  – ускорение свободного падения,  $c$  – коэффициент Шези.

Примеры такого русла дают Таганская крутая излучина на р. Оби, шпора которой представлена сегментно-островной поймой, а в русле вдоль нее идет образование новых островов и осередков, линейные размеры которых сопоставимы с шириной русла –  $L_0 > 1$  км,  $B_0 > 0,5$  км, а величина критерия И.Ф. Карасева возрастает в 1,5 раза по сравнению со смежными участками (рис. 1, А), и Сольвычегодская сегментная развитая излучина на р. Вычегде (рис. 1, Б), где  $L_0$  и  $B_0$  в несколько раз превышают

ширину наиболее водного рукава, проходящего вдоль правого берега, за счет чего суммарная ширина русла достигает 2,5–3 км. При этом водность проток между островами в шпоре таких излучин составляет в сумме до 30% от общего стока реки, возрастая в многоводную фазу режима и снижаясь до 1–2%, вплоть до полного пересыхания в межень. Похожие колебания водности межостровных проток характерны и для прибрежных односторонних разветвлений на прямолинейных участках. Отвлечение части расхода воды в эти протоки в период, когда он является руслоформирующим, сказывается, во-первых, в снижении параметров излучин (радиусов кривизны, шага) и увеличении степени развитости  $l/L$  как следствие частичного рассредоточения стока по протокам среди островов, составляющих их шпору (поскольку  $r, L, l/L = f(Q_\phi)$  – руслоформирующего расхода воды), и, во-вторых, в формировании мелководных перекатов в основном рукаве на перегибах между смежными излучинами. Например, у развитых излучин разветленно-извилистого русла нижней Вычегды их шаг и радиус кривизны в 2,3–2,5, на нижнем Вилное – в 3,6–4,0 раза меньше, чем у развитых сегментных свободных излучин на смежных участках этих рек (табл.). Чем круче излучина такого разветленно-извилистого русла, тем меньше водность второстепенных межостровных рукавов в привершинной части шпоры, и тем меньше их влияние на изменение параметров излучин.

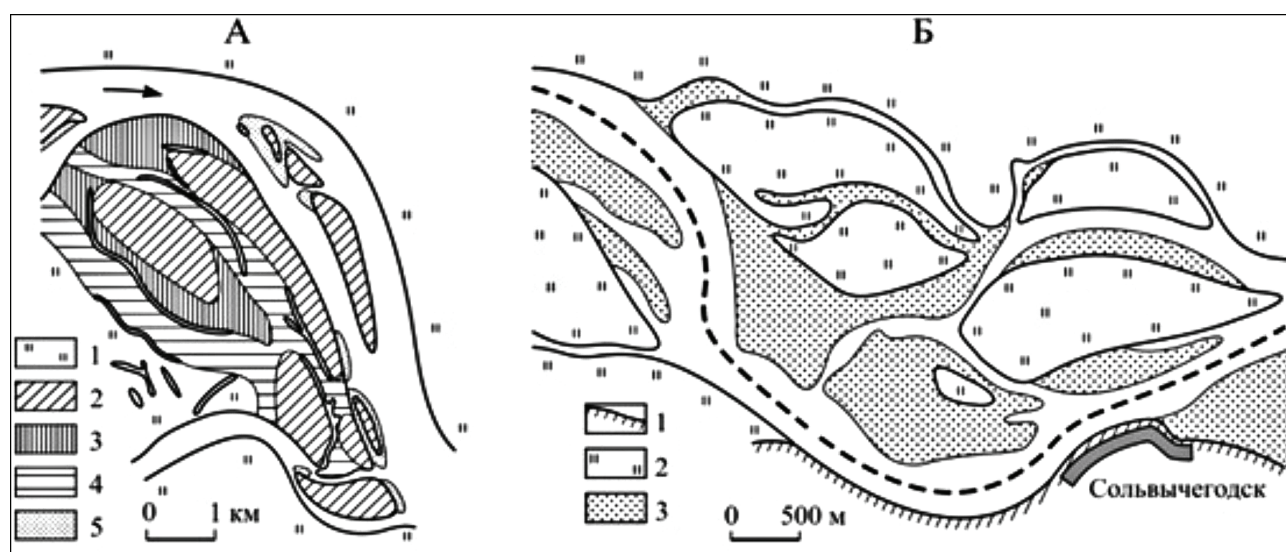


Рис. 1. Разветленно-извилистые русла:

- А – верхняя Обь, Таганская излучина (1 – береговая пойма; 2 – острова; 3 – причлененные к островам участки молодой поймы, образовавшиеся при зарастании отмелей; 4 – обмелевшие и превратившиеся в ложбины на пойме бывшие протоки; 5 – прирусловые отмели); Б – нижняя Вычегда, Сольвычегодская излучина (1 – надпойменная терраса; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели)

Fig. 1. Branched-winding channels:

- A – Upper Ob, Taganskaya bend (1 – coastal floodplain; 2 – islands; 3 – sections of young floodplain attached to the islands, formed through the overgrowth of shoals; 4 – former channels that have become shallow and turned into hollows on the floodplain; 5 – sandbanks); B – Lower Vychegda, Solvychevodskaya bend (1 – terrace above the floodplain; 2 – floodplain; 3 – sandbanks)

Таблица

**Параметры развитых сегментных излучин и излучин разветвленно-извилистого русла на нижней Вычегде и нижнем Вилюе [Чалов, 2008]**

| Река    | $Q_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{с}$ | Разветвленно-извилистое русло |                | Сегментная излучина |                |
|---------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|----------------|
|         |                                       | $r, \text{ м}$                | $L, \text{ м}$ | $r, \text{ м}$      | $L, \text{ м}$ |
| Вычегда | 1000                                  | 600                           | 1100           | 1400                | 2800           |
| Вилюй   | 1360                                  | 500                           | 1000           | 2000                | 3600           |

Наличие протоков и рукавов, расчленяющих шпору излучин разветвленно-извилистого русла, обуславливает спрямление последних уже на стадии развитой сегментной излучины при соотношении  $l/L = 1,4-1,7$ , причем нередко оно происходит уже при минимальных его значениях (1,4–1,5). Поэтому излучины разветвленно-извилистого русла очень редко бывают крутыми [Камышев, 2022]. Однако спрямление их происходит не по тыловой, наиболее пониженной части пойменной шпоры, а вследствие развития одного из рукавов (протоков) в привершинной части излучины, являющемся наиболее многоводным из всех, образующих разветвление. При таком спрямлении излучины разветвленно-извилистого русла обычно возникает одиночное разветвление, распределение расходов воды по рукавам которого зависит от местных условий: рукава или близки по водности, или большая часть стока сосредоточивается в спрямляющем рукаве (вдоль островов, образующих выпуклый берег излучины), или сохраняется в старом русле, но в меньшем объеме, чем до развития спрямления, если оно находится под направляющим воздействием ведущего берега выше по течению. Критерий И.Ф. Карасева при этом довольно сильно варьирует как в основном русле, так и в рукавах, расчленяющих шпору. Так, на Оби величина критерия в основном русле подобных разветвлений достигает 37,8 при среднем значении 15,0, а в рукавах, пересекающих шпору, может составлять 84,2 при среднем значении 24,6. Во втором случае это связано с большой шириной спрямляющей протоки и наличием в ней осложняющих форм в виде осередков [Камышев, 2022].

Береговая линия разветвленно-извилистого русла изогнутая, развитие излучин происходит вследствие последовательного образования островов и их причленения к пойменной шпоре. Являясь переходной формой между излучинами и разветвлениями русла на рукава и сохраняя морфологические черты меандрирования, развитие разветвленно-извилистых русел осуществляется благодаря формированию у выпуклого берега не побочной, с зарастающими пригребневыми частями и превращения их в пойменные гривы, а осередков, превращающихся в ходе их эволюции в элементарные острова, увеличивающие

в дальнейшем свои параметры [Голубцов, Чалов, 2019]. При этом их форма в плане (соотношение  $L_0/B_0$ ) может изменяться в широких пределах, соответствуя изометричным  $L_0/B_0 < 3$  или вытянутым  $L_0/B_0 > 4$  островам. Они характерны для больших меандрирующих рек со слабоустойчивым широким руслом, в котором в многоводную фазу режима динамическая ось потока разделяется на ряд ветвей, смещается к выпуклому берегу (как следствие зависимости радиуса кривизны  $r$  от расхода воды  $r \sim Q$ ), способствуя развитию побочных протоков и формированию осередков, по мере развития излучин увеличивающихся в размерах и превращающихся в острова.

В результате рельеф формирующихся в процессе развития излучины пойменных шпор оказывается ложбинно-островным, присущим разветвленным руслам, но ориентировка элементов рельефа (гряд – бывших островов и ложбин – бывших межостровных протоков) соответствует изменяющейся кривизне излучин. Поэтому А.В. Чернов [2009] предложил называть такие поймы сегментно-островными, подобно сегментно-гивистым поймам меандрирующих рек, на которых изогнутость грив (прирусовых валов, формирующихся у выпуклых берегов излучин) отражает развитие излучины и уменьшение радиуса ее кривизны [Чернов, 1983].

В чередующихся односторонних разветвлениях контуры русла в бровках береговой поймы остаются относительно прямолинейными, и шпоры излучин основного рукава представлены одним прибрежным островом или группой островов. Динамическая ось потока при этом искривляется. Этим чередующиеся односторонние разветвления отличаются от разветвленно-извилистого русла, в котором происходит нарушение прямолинейности очертаний русла в бровках поймы, а шпоры излучин представлены массивами ложбинно-островной поймы. Чередующиеся односторонние разветвления формируются, как правило, в слабоустойчивом русле, уступая по показателю степени устойчивости только параллельно-рукавным и сложным сопряженным разветвлениям, и, несмотря на наличие главного рукава с наибольшей долей расхода, отличаются сложной многорукавностью и картиной распределения стока.



Если разветвление формирует один прибрежный остров, по мере развития излучины основного рукава со временем происходит перераспределение потока в узле разветвления, и большая часть расхода воды перемещается в бывший второстепенный рукав между островом и берегом, все разветвление трансформируется в одиночное, а при расположении таких островов цепочкой вдоль реки в шахматном порядке у противоположных берегов – в сопряженные разветвления. Последующая эволюция этих разветвлений может привести к восстановлению чередующихся односторонних, но с зеркальным расположением основного рукава по отношению к исходному.

Для многорукавных чередующихся разветвлений характерно продольное смещение прибрежных островов, образующих сегменты излучин основного

(многоводного) рукава (рис. 2, А). Являясь большим по водности, основной рукав, образующий излучину, сосредоточивает до 60–70% расхода воды, остальная часть стока рассредоточивается по системе мелководных проток. Динамическая ось потока основного рукава прижимается к оголовкам островов, вызывая их интенсивный размыв (до 10–15 м/год). Напротив островов такой же интенсивный размыв противоположного пойменного берега приводит к образованию в нем выбоин (вогнутости), вследствие чего нарушается прямолинейность контуров береговой линии, которая приобретает фестончатые очертания. В низовой части группы островов происходит аккумуляция продуктов размыва, обуславливающая смещение стрежня потока к островам смежной нижележащей группы, также вызывая их размыв.

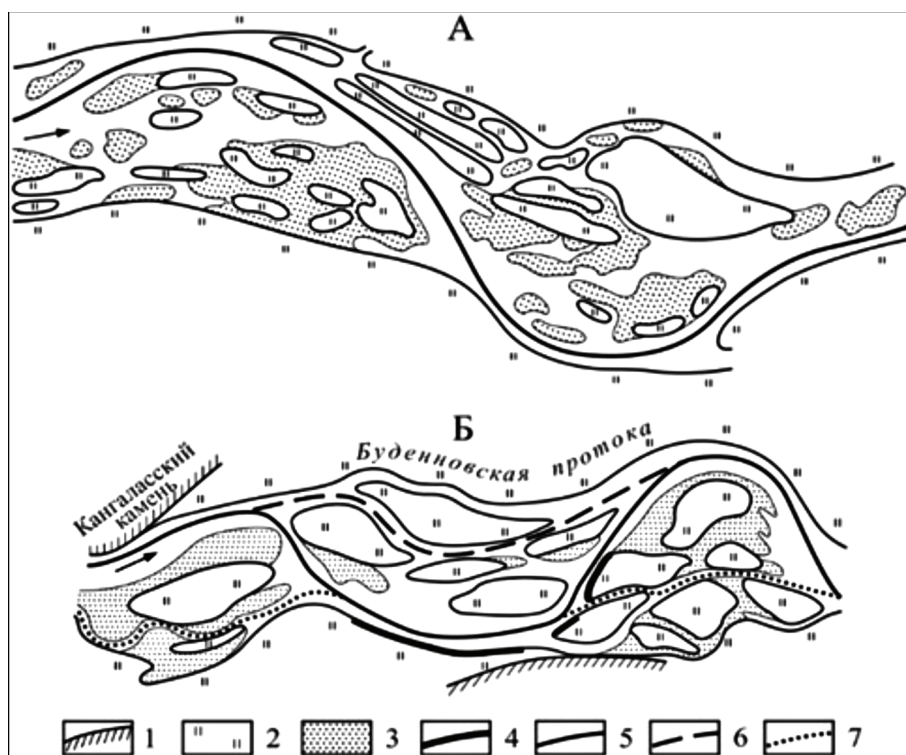


Рис. 2. Чередующиеся односторонние разветвления на верхней Оби (ниже п. Быстрый Исток) (А) и их трансформация в параллельно-рукавное (средняя Лена) (Б):

1 – коренные берега; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – фронт размыва берегов; положения главного течения: 5 – в чередующихся односторонних разветвлениях; 6 – во втором рукаве при трансформации их в параллельно-рукавное (текущее); 7 – перспективное

Fig. 2. Alternating branches on the Upper Ob (below Bystryy Istok) (A) and their transformation into parallel-branch channel (Middle Lena) (B):

1 – bedrock banks; 2 – floodplain; 3 – sandbanks; 4 – coast erosion front; positions of the main stream: 5 – in alternating branches; 6 – in the second branch after their transformation into a parallel branch (nowadays); 7 – future

Спрямление излучин основного рукава в чередующихся многорукавных разветвлениях происходит редко из-за преимущественно продольного смещения излучины основного рукава и всей груп-

пы островов, образующих разветвление; при этом развитие получает рукав вдоль или вблизи береговой поймы в основании островного сегмента. На судоходных реках такому спрямлению способству-

ет разработка капитальной прорези в этом обычно наиболее водном рукаве. Нередко чередующиеся односторонние разветвления следуют сразу за параллельно-рукавными, поскольку в условиях повышения стока рек описанное выше спрямление сопровождается трансформацией чередующихся разветвлений в параллельно-рукавное. Таково, например, развитие левого рукава Буденновской протоки на средней Лене ниже Кангаласского камня (см. рис. 2, Б) и ожидаемое спрямление в смежных, расположенных выше и ниже прибрежных разветвлениях. На верхней Оби (широтный участок ниже слияния Бии и Катунь) подобная трансформация чередующихся односторонних многорукавных разветвлений произошла благодаря последовательному трансгрессивному (вниз по течению) распространению выносов наносов из сливающихся рек (главным образом, из Катунь), происходящему на фоне некоторого снижения водности и медленного направленного врезания реки. Этот процесс продолжался на протяжении всей второй половины XX в., и к настоящему времени этот тип прибрежных разветвлений сохранился только на участке ближе к устью р. Чарыш [Русловые процессы..., 1996]. Показатели устойчивости русла (числа Лохтина и коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева) уменьшились при смене типа русла в среднем на 25–30%. Аналогично на средней Лене в районе г. Якутска участок параллельно-рукавных разветвлений сменяется чередующимися односторонними, расположенными от п. Жатай до мыса Кангаласский Камень.

Более распространены на больших реках с меандрирующим руслом одиночные разветвления, образованные элементарными и малыми, реже средними островами, иногда двумя-тремя такими островами, составляя, как правило, формы второго или третьего порядков, которые достигают нескольких км в длину. В основном средние, очень редко большие острова встречаются между смежными большими излучинами на относительно протяженных прямолинейных участках – вставках между ними (рис. 3). По своей морфологии, распределению расходов воды и многолетним переформированиям такие разветвления аналогичны одиночным, но с преобладающим влиянием на них деформаций, происходящих на верхней (считая по течению реки) излучине, эволюция которой во времени (продольное и поперечное смещение) определяет периодическое развитие левого или правого рукавов. Положение главного течения реки на каждом этапе в том или ином рукаве сказывается на развитии нижней излучины. Водность обоих рукавов при этом варьирует в пределах 1:2 и 2:1 в зависимости от происходящих переформирований. Так, например, на нижнем Иртыше средние скоро-

сти размыва берегов в верхней излучине составляют около 1 м/год (максимальные – 1,9 м/год); в рукавах одиночного разветвления в среднем от 1 до 1,4 м/год (максимум – 2,3 м/год); а на нижней излучине – 1,5 и 2,1 м/год соответственно.

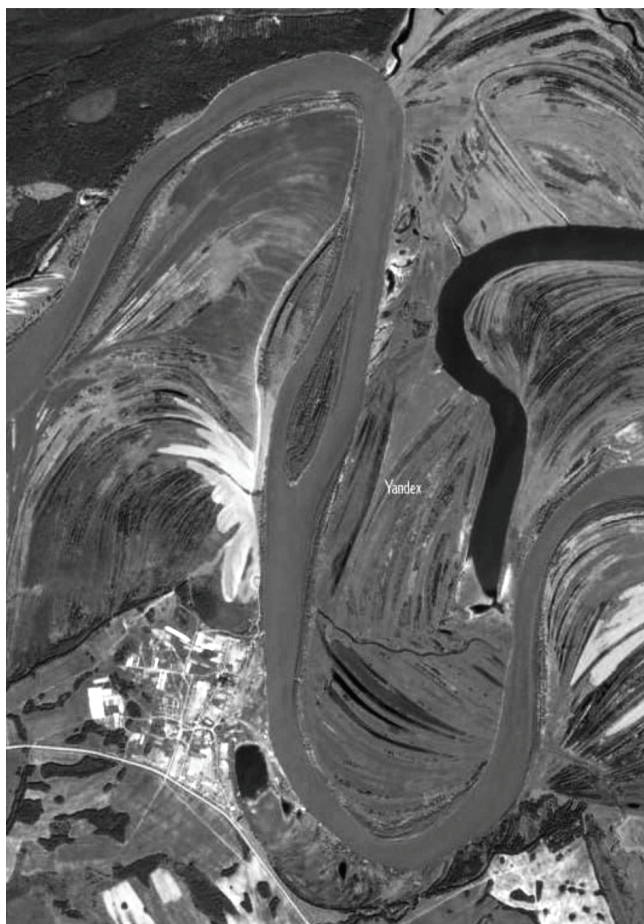


Рис. 3. Одиночное разветвление между смежными большими излучинами (р. Иртыш)

Fig. 3. Single branching between adjacent large meanders (the Irtysh River)

Образование больших излучин связано с остаточной поперечной циркуляцией [Розовский, 1957; Маккавеев, 1955], благодаря которой удлиняется область сопряжения излучин, и на переходе от одной к другой формируется прямолинейный участок (собственно это вытекает и из второго закона Фарга [Fargue, 1908]: плесовая ложина и самая мелкая часть переката сдвинуты по отношению к створам с наибольшей и наименьшей кривизной, соответственно, вниз по течению приблизительно на  $\frac{1}{4}$  длины системы плес – перекат). При этом удлиненные крылья таких больших излучин превращаются в прямолинейные вставки между излучинами, ориентированными по диагонали к оси днища долины, пересекая пойму. Вследствие этого во время половодья течения в

русле и на затопленной пойме не совпадают по направлениям, происходит слив воды с поймы со стороны верхней излучины и перелив воды на пойменный сегмент нижней излучины (рис. 4). Это, в свою очередь, обуславливает активизацию размыва берегов, чему способствуют возникновение возле них вихрей с горизонтальной осью [Ле-

явский, 1893; Маккавеев, 1955], переносящих размывый материал к центральной части русла. В результате образуется (см. рис. 4) местное расширение русла, в котором формируется осередок, со временем (при зарастании) превращающийся в остров. Величина критерия И.Ф. Карасева возрастает на подобных участках в 1,3–2,0 раза.

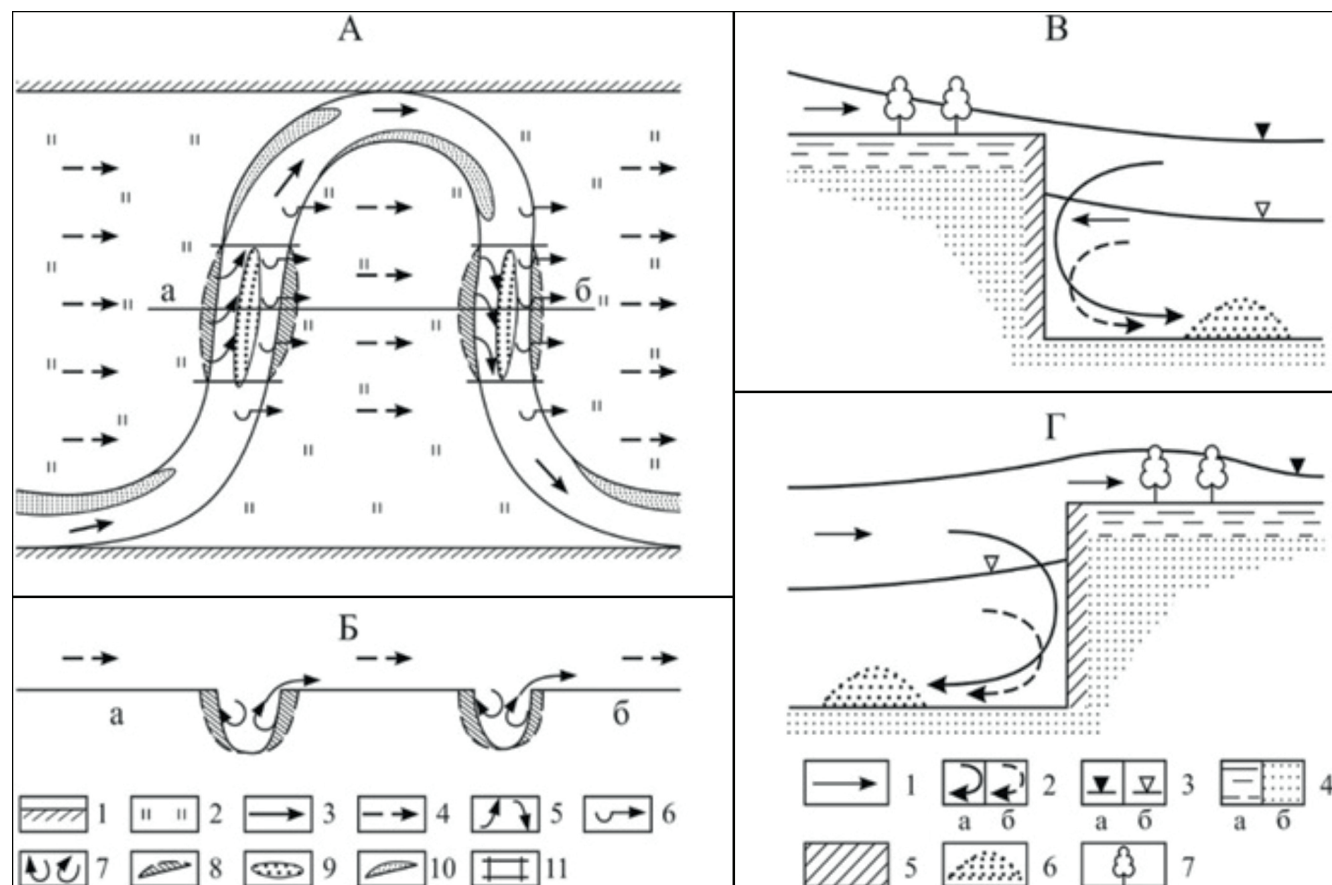


Рис. 4. Формирование одиночных разветвлений между смежными большими излучинами:

А – план русла; Б – профиль по оси днища долины (1 – борта днища долины; 2 – пойма; 3 – направление течения руслового потока; 4 – течения на затопленной пойме; 5 – слив воды с поймы в русло; 6 – перелив воды из русла в пойму; 7 – вихревые течения в русле при пересечении руслового и пойменного потоков; 8 – размывы берегов при пересечении руслового и пойменного потоков; 9 – осередки в местных расширениях русла; 10 – прирусловые отмели у берегов излучин; 11 – прямолинейные вставки между излучинами); В, Г – течения, возникающие возле пойменных подмываемых берегов между смежными излучинами, связанные с ними их размыв и образование осередка при сливе воды с поймы (В) и при переливе воды из русла на пойму (Г) (1 – течения, набегающие на берег; 2 – вихрь с горизонтальной осью при сливе воды с поймы в русло и переливе воды из русла (а) и в межень (б); 3 – уровни водной поверхности при затопленной пойме (а) и в межень (б); 4 – аллювиальные отложения – пойменный наилок (а), русловая фация (б); 5 – размываемый берег; 6 – аккумуляция размывого материала; 7 – растительность на пойме)

Fig. 4. Formation of single branching between adjacent large meanders:

A – plan of the channel; Б – profile along the axis of the valley bottom (1 – sides of the valley bottom; 2 – floodplain; 3 – direction of the channel flow; 4 – currents on the flooded floodplain; 5 – drain water from the floodplain to the channel; 6 – overflow of water from the channel to the floodplain; 7 – turbulent streams in the channel at the intersection of channel and floodplain flows; 8 – bank erosion at the intersection of channel and floodplain flows; 9 – sandbanks in local channel widenings; 10 – sandbanks near the banks of meanders; 11 – straight channel between the meanders); В, Г – currents that occur near the floodplain eroded banks between adjacent meanders, their erosion and formation of a sandbank when water is drained from the floodplain (B) and when water is overflowed from the channel on the floodplain (Г) (1 – currents running ashore; 2 – a vortex with a horizontal axis when water is drained from the floodplain into the channel and water overflows from the channel (a) and during the low water (б); 3 – water surface levels with a flooded floodplain (a) and during the low water (б); 4 – alluvial deposits – floodplain silt (a), channel facies (б); 5 – eroded coast; 6 – accumulation of eroded material; 7 – vegetation on the floodplain)



Сходные условия возникают на сундучных излучинах, которые представляют собой комбинацию из двух излучин, вершины которых располагаются возле одного и того же берега, и прямолинейной вставки между ними. Чаще всего такие излучины формируются возле коренных берегов (в этом случае верхняя излучина – вынужденная, нижняя – адаптированная [Маккавеев, 1971], нижнее крыло верхней и верхнее крыло нижней располагаются вдоль коренного берега и, объединяясь, создают прямолинейную вставку), но иногда встречаются

среди поймы, если роль ведущего берега между вершинами играет уступ высокой, редко затопляемой поймы. Здесь также возникает местное расширение русла благодаря направляющему воздействию на поток неровности ведущего берега в нижнем крыле верхней излучины (рис. 5). В данном случае на средней Оби средние скорости размыва берегов для верхнего и нижнего крыльев сундучной излучины составляют более 3 м/год, а максимальные – до 6,5 м/год, тогда как в районе местного расширения они достигают 2,4 и 4,1 м/год соответственно.



Рис. 5. Сундучная излучина в левом судоходном рукаве Канеровского разветвления средней Оби (ниже г. Колпашево) с островом в местном расширении русла

Fig. 5. Chest-meander in the left navigable branch of the Kanerovskoe branching of the Middle Ob (below the Kolpashevo town) with an island in a local widening of the channel

Если образование разветвления на прямолинейной вставке не происходит, большие излучины трансформируются в петлеобразные благодаря развитию вторичных излучин на их крыльях, на которых берега отступают со скоростью в среднем более 2 м/год при максимуме почти 4 м/год. Однако иногда одно из крыльев излучин сохраняет относительно прямолинейные очертания, и тогда в его пределах формируется одиночное разветвление с одновременным расширением русла за счет размыва берегов со средней скоростью до 2 м/год, максимальной – до 3 м/год.

В пределах самих излучин острова формируются в их привершинных частях, на верхнем или ниж-

нем крыльях. В большинстве случаев они также приурочены к местным расширениям русла (иногда в 2–3 раза по сравнению с участками тех же излучин выше и ниже по течению, значение критерия И.Ф. Карасева при этом увеличивается до 2 раз) (рис. 6). Расширение русла обуславливает разделение потока на несколько ветвей течения, что приводит к образованию островов в зонах замедления течения между ними. Форма, размеры и структура островов, а также распределение расходов воды по рукавам разветвлений – средних, малых и элементарных – зависит от степени развитости (крутизны) излучин  $I/L$ , их типа – свободная, вынужденная или вписанная, а также генезиса самих островов. Зача-



стую на больших реках такие острова имеют вытянутую, несколько изогнутую форму в соответствии со своим расположением и имеют длину  $L_0$  от 1 до 4 км, а максимальную ширину  $B_0$  – 0,5–1 км. Скорости размыва берегов на таких излучинах варьируют в широких пределах: средние – от 1 до 4,4 м/год, максимальные – 1,4–6,3 м/год.

На крыльях и в привершинных частях излучин преобладают острова, образовавшиеся при зарастании осередков – начальной формы развития островов. Они могут быть элементарными, малыми или средними, состоящими из нескольких объединившихся элементарных и малых, являются следствием эволюции как самих островов, так и излучины, в пределах которой они формируются. При этом основной расход воды обычно проходит в рукаве вдоль вогнутого берега излучины, составляя от 70 до 90% стока реки. При достижении излучиной в ходе ее развития стадии крутой, большая часть рас-

хода воды перемещается в рукав у выпуклого берега. В привершинных частях крутых излучин, у которых  $l/L > 1,7$ , острова могут иметь эрозионное происхождение, являясь следствием частичного спрямления излучин (рис. 7) – отторжения крайней выпуклой части шпоры при размыве потоком половодья, затопившего пойму, одной из ложбин грядистого рельефа поймы. В приведенном примере образование спрямляющего рукава в вершине Мануйловской излучины р. Иртыша произошло при  $l/L = 1,98$ ; однако из-за сопряжения с выше находящейся излучиной и отходом от верхнего крыла излучины почти под прямым углом этот рукав дальнейшего развития не получил: несмотря на сопоставимую с основным рукавом ширину, его водность в половодье – около 8–9%, в межень он обсыхает, будучи перекрыт на заходе массивным побочнем. В основном русле наблюдаются интенсивные отступления берегов (максимальные – до 15 м/год).

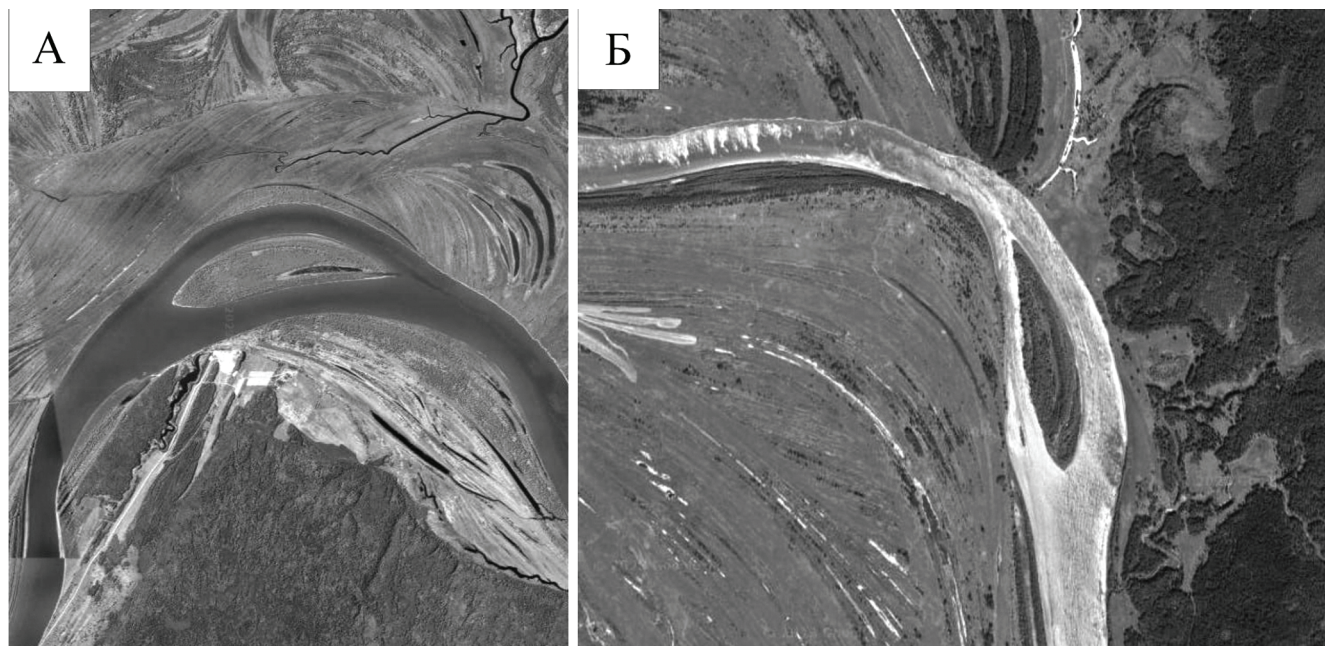


Рис. 6. Разветвления в местных расширениях русла на излучинах р. Иртыш:  
А – в привершинной части; Б – в верхнем крыле

Fig. 6. Branches in the local widened channels on the meanders of the Irtysh River:  
А – in their top part; Б – in their upper wing

На крутых излучинах, на которых произошло нарушение условия безотрывного обтекания потоком берегов (правило Миловича –  $r < 3b_p$ ), в привершинной части русло расширяется в 2–3 раза, стрежень потока перемещается к выпуклому берегу, размывая его со средней скоростью на нижней Оби 1–2 м/год (максимум – более 3 м/год), на нижнем Иртыше – до 9 и 13 м/год, соответственно, а у вогнутого возникает водоворотная зона. В таких условиях в вершине

излучины формируется осередковое разветвление, причем осередок имеет овальную форму. Со временем он зарастает, превращаясь в элементарный остров, сохраняющий такую же форму. Протока вдоль вогнутого берега мелеет, превращается во второстепенную (водность – первые проценты), а сам остров заполняет выбоину.

Формирование островов на верхних крыльях излучин является следствием подпора потока

от изгиба русла, в зоне влияния которого поток «блуждает», русло расширяется, аккумулируются наносы и формируются осередки, со временем также превращающиеся в острова. Наиболее ярко это проявляется на вписанных и вынужденных излучинах, где вогнутый берег в привершинной части является коренным или представлен высокой, редко затопляемой поймой, и вдоль него располагается нижнее крыло излучины (рис. 8). Параметры таких островов сопоставимы с шириной русла, а из-за направленной аккумуляции нано-

сов происходит их объединение и укрупнение, со временем они могут достигать стадии большого острова.

На больших реках острова формируются иногда в нижних крыльях излучин, если здесь интенсивный размыв вогнутого берега приводит к образованию местного расширения русла. Межостровные протоки и рукава, отделяющие острова от шпоры излучины, обычно маловодны, так как располагаются ниже вершины излучины, направляющей поток к вогнутому берегу.



Рис. 7. Разветвление в привершинной части крутой излучины, образовавшееся вследствие частичного отторжения ее шпоры (Мануйловский поворот на р. Иртыш)

Fig. 7. Branching in the near-top part of a steep meander, formed as a result of partial rejection of its spur (Manuilovsky turn on the Irtysh River)

Формирование расширения русла в нижнем крыле излучины и разветвления в нем связаны также с трансформацией сегментной излучины в заваленную и приобретением ею асимметричной формы, т. е. со смещением вершины излучины вниз по течению по отношению к ее геометрической оси. Распределение расходов воды в таких разветвлениях зависит от направляющего воздействия на поток берегов на смежных вышележащих участках русла и изменяется в широких пределах.

В разветвлениях в привершинных частях вписанных излучин наибольшую водность обычно сохраняет рукав, проходящий вдоль коренного вогнутого

берега; тенденция к обмелению характерна для рукава у выпуклого берега, так как заход в него находится за плечом пойменного берега в верхнем крыле излучины. Имеет значение также и расширение его в области аккумуляции наносов во время половодья.

Формирование разветвлений возможно также и в рукавах прорванных излучин, особенно если они играют наносотсасывающую роль (для влекомых наносов) при большом угле их ответвления. Такие острова составляют формы русла второго и чаще третьего порядка, а их размеры невелики и зависят от ширины и водности спрямляющего второстепенного рукава.



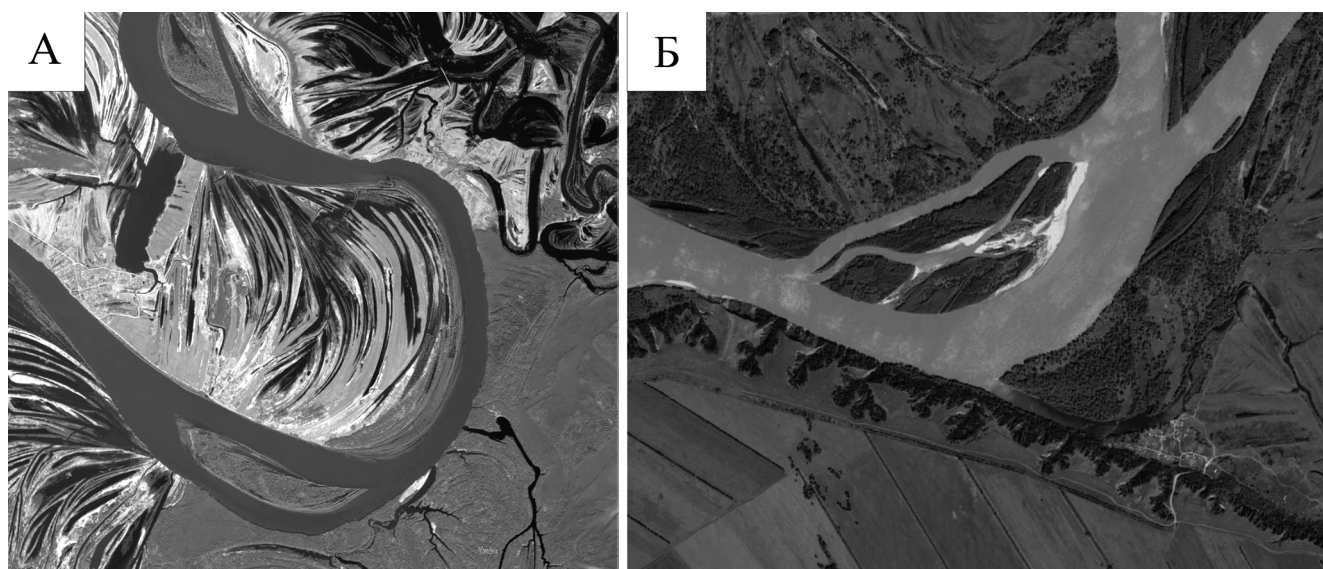


Рис. 8. Разветвления:

А – в расширении на верхнем крыле вписанной излучины (р. Иртыш); Б – в привершинной части вынужденной излучины (верхняя Обь ниже устья р. Чумыша)

Fig. 8. Branches:

А – in the extension on the upper wing of the inscribed meander (the Irtysh River); Б – in the near-top part of the forced meander (Upper Ob below the mouth of the Chumysh River)

### ВЫВОДЫ

Разветвленно-извилистые русла и чередующиеся односторонние разветвления характеризуются формированием островов, огибая которые, основные по водности рукава образуют сегментные излучины. В одних случаях острова частично объединяются и, причленяясь к берегам, создают шпоры излучин, и только привершинные части последних остаются представленными островами, разделенными межостровными протоками. В других случаях на реках больших размеров односторонние чередующиеся разветвления составляют островные пойменные сегменты, и в бровках береговой поймы русло сохраняет квазипрямолинейные очертания. В результате разветвленно-извилистое русло в своем развитии отражает эволюцию излучины, тогда как излучина основного рукава в односторонних чередующихся разветвлениях – развитие русловых разветвлений. Обе разновидности разветвлений свойственны большим рекам, для которых характерно разделение потока на ветви течения. Происходящее при этом рассредоточение стока по рукавам между островами обуславливает изменение морфологических параметров основного рукава, образующего излучину, в соответствии с его водностью и, как следствие, формирование в нем перекатов из-за снижения транспортирующей способности потока.

Образование разветвлений на излучинах русла

также характерно для больших меандрирующих рек. Острова возникают в привершинных частях излучин, если здесь в процессе русловых деформаций происходит расширение русла или при его искривлении (крутые излучины) нарушаются условия безотрывного обтекания берегов, а динамическая ось потока смещается к вогнутому берегу, вызывая его размыв. На крутых излучинах может также происходить отчленение привершинной части шпоры с образованием спрямляющей протоки, но ее дальнейшее развитие зависит от угла ответвления от основного русла.

Разветвление возникает также на прямолинейных вставках между смежными большими излучинами, располагающимися по диагонали (или поперек) поймы; вследствие взаимодействия руслового и пойменного (во время половодья) потоков в водоворотных зонах возникает местное расширение русла, и в нем формируется осередок, со временем превращающийся в остров. В верхних крыльях излучин, особенно вынужденных, разветвления связаны с подпором потока, возникающим при встрече потока с коренным берегом или из-за крутого поворота русла в вершине излучины.

Условия формирования разветвлений на излучинах или в основных рукавах разветвленно-извилистых русел определяют состав регуляционных мероприятий при водохозяйственном и транспортном освоении больших рек.

**Благодарности.** Работа выполнена по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-17-00065).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голубцов Г.Б., Чалов Р.С. Острова верхней Оби: морфометрическая характеристика, эволюция и динамика // Геоморфология. 2019. № 1. С. 81–92.
- Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 216 с.
- Камышев А.А. Гидроморфология и переформирования широкопойменных русел больших равнинных рек (на примере Оби и Лены): автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М., 2022. 27 с.
- Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
- Кондратьев Н.Е. Русловые деформации в меандрирующих руслах // Труды ГГИ. 1954. Вып. 44(98). С. 5–13.
- Лебявский Н.С. О речных течениях и формировании речного русла: сб. науч. тр. 2-го съезда инженеров-гидротехников в 1893 г. СПб., 1893 // Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 108–136.
- Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1971. 116 с.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
- Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 264 с.
- Розовский И.Л. Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд-во АН УССР, 1957. 188 с.
- Русловые процессы на реках Алтайского региона. М.: Изд-во МГУ, 1996. 244 с.
- Чалов Р.С. Извилистость или разветвленность потоков и формирование меандрирующих и разветвленных на рукава речных русел // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 3. С. 3–12.
- Чалов Р.С. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел // Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. Т. 1. 608 с.
- Чернов А.В. География и геоэкологическое состояние речных русел и пойм рек Северной Евразии. М.: Крона, 2009. 684 с.
- Чернов А.В. Геоморфология пойм равнинных рек. М.: Изд-во МГУ, 1983. 198 с.
- Fargue L. La forme du lit des a fond mobile, Paris, Gauthier – Villars, 1908, 187 p.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Rosgen D.L. A classification of natural rivers, *Catena*, 1994, vol. 22, p. 169–199.
- Schumm S.A. The fluvial system, New York, Wiley, 1977, 338 p.

Поступила в редакцию 10.05.2023

После доработки 15.07.2023

Принята к публикации 27.07.2023

## FORMATION OF BRANCHES AT RIVER MEANDERS

R.S. Chalov<sup>1</sup>, A.A. Kamyshev<sup>2</sup>, A.A. Kurakova<sup>3</sup>, G.B. Golubtsov<sup>4</sup><sup>1–4</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography<sup>2–4</sup> Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes<sup>1</sup> Department of Land Hydrology, professor, D.Sc. in Geography; e-mail: rachalov@mail.ru<sup>2</sup> Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: arsenii.kamyshev@yandex.ru<sup>3</sup> Leading Engineer, Ph.D. in Geography; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru<sup>4</sup> Engineer, Ph.D. in Geography; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

When studying channel morphodynamics, the processes and forms of meandering and branching are considered independently. However, the development of meanders on large rivers is complicated by the formation of islands on their limbs and in the near-top parts. The most striking manifestation of the process is the branched-winding channels, which develop as a result of the successive formation of islands, creating spurs of meanders if attached to the coastal floodplain. The relief of the floodplains of such rivers is hollow-island in contrast to the ridged relief of typical meandering rivers. Another form of such channels of large rivers is alternating unilateral ramifications, in which the meanders of the main (high-water) branch go around the groups of islands located in a checkerboard pattern, and the channel itself in the floodplain banks remains quasi-rectilinear while in a branched-winding channel it forms segmental meanders. The presence of branches at a meander of the channel disperses the runoff, and decreases the amount of water in the main branch, thus affecting the parameters of the meanders.

Islands are also formed in the near-top parts of meanders, where its dynamic axis shifts towards the convex coast due to the violation of continuous flow around the banks, and erodes it. In the resulting local widening of the channel, a middle center appears and, when it is overgrown, an island is formed. A local widening of the channel is formed on rectilinear «inserts» between adjacent large meanders when the floodplain and channel flows intersect during the flood, and a middle or island is also formed in it. On the upper wings of steep bends,

especially forced meanders, the formation of branches is associated with the flow backwater that occurs when it approaches the bedrock bank at the top of the meander at a high angle.

The formation of branchings at the meanders of a channel should be taken into account during river development as a factor that can influence the conditions of navigation and influence the channel reshaping, which is particularly important at the places where linear structures, such as bridges and pipelines, cross the rivers.

**Keywords:** branched-winding channel, alternating branching, islands, sandbanks, dispersal of runoff, local widened channel

**Acknowledgements.** The paper is prepared according to the scientific research plans of the Department of Land Hydrology and the Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes of the Lomonosov Moscow State University and financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-17-00065).

## REFERENCES

- Chalov R.S. Izvilistost' ili razvetvlennost' potokov i formirovanie meandriruyushchikh i razvetvlennykh na rukava rechnykh rusel [Meandering or branching of streams and the formation of meandering or branching river channels], *Vest. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no 3, p. 3–12. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, vyp. 1, Ruslovyte protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [Riverbed science: theory, geography, practice, vol. 1, Channel processes: factors, mechanisms, forms and conditions of channel formation], Moscow, LKI Publ., 2008, 608 p. (In Russian)
- Chernov A.V. *Geografiya i geoekologicheskoe sostoyanie rechnykh rusel i poim rek Severnoi Evrazii* [Geography and geoecological standing of the channels and floodplains of the rivers of northern Eurasia], Moscow, Krona Publ., 2009, 684 p. (In Russian)
- Chernov A.V. *Geomorfologiya poim ravninnykh rek* [Geomorphology of lowland river floodplains], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1983, 198 p. (In Russian)
- Fargue L. La forme du lit des a fond mobile. Paris, Gauthier – Villars, 1908, 187 p.
- Golubtsov G.B., Chalov R.S. *Ostrova verhnjej Obi: morfometricheskaya kharakteristika, evolyuciya i dinamika* [Islands of the Upper River Ob: morphometric characteristic, evolution and dynamics], *Geomorfologiya* [Geomorphology], 2019, no. 1, p. 81–92. (In Russian)
- Grishanin K.V. *Teoriya ruslovogo protsessa* [Channel process theory], Moscow, Transport Publ., 1972, 216 p. (In Russian)
- Kamyshev A.A. *Gidromorfologiya i pereformirovaniya shirokopoimennykh rusel bol'shikh ravninnykh rek (na primere Obi i Leny)* [Hydromorphology and reformation of wide-floodplain channels of large plain rivers (case study of Ob and Lena Rivers)], Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 2022, 27 p. (In Russian)
- Karasev I.F. *Ruslovyte protsessy pri perebroske stoka* [Channel processes during river flow transfer], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 288 p. (In Russian)
- Kondrat'ev N.E. *Ruslovyte deformatsii v meandriruyushchikh ruslakh* [Channel deformations in meandering channels], *Trudy GGI* [Proceedings of the State Hydrological Institute], 1954, vol. 44(98), p. 5–13. (In Russian)
- Lelyavskii N.S. [About river flows and riverbed formation Proceedings of 2<sup>nd</sup> meeting of hydrotecnic engineers, St. Petersburg, 1893], *Voprosy gidrotekhniki svobodnykh rek* [Hydrotechnical problems of open rivers], Moscow, Rechizdat Publ., 1948, p. 108–136. (In Russian)
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River channel and erosion in its basin], Moscow, AS USSR Publ., 1955, 347 p. (In Russian)
- Makkaveev N.I. *Stok i ruslovyte protsessy* [Runoff and channel processes], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1971, 116 p. (In Russian)
- Popov I.V. *Deformatsii rechnykh rusel i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Riverbed deformations and hydrotechnical construction], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965, 328 p. (In Russian)
- Rosgen D.L. A classification of natural rivers, *Catena*, 1994, vol. 22, p. 169–199.
- Rozovskii I.L. *Dvizhenie vody na povorote otkrytogo rusla* [Movement of water at a bend of an open channel], Kiev, AS USSR Publ., 1957, 188 p. (In Russian)
- Ruslovyte protsessy na rekakh Altaiskogo regiona* [Channel processes on the rivers of the Altai region], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1996, 244 p. (In Russian)
- Rzhanitsyn N.A. *Rusloformiruyushchie protsessy rek* [Processes of riverbed formation], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 264 p. (In Russian)
- Schumm S.A. *The fluvial system*, New York, Wiley, 1977, 338 p.

Received 10.05.2023

Revised 15.07.2023

Accepted 27.07.2023



# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В ВОДАХ ЗАЛИВА АНИВА (ОХОТСКОЕ МОРЕ)

**А.В. Леонов<sup>1</sup>, В.С. Архипкин<sup>2</sup>, В.М. Пищальник<sup>3</sup>, Е.М. Латковская<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Институт океанологии имени П.П. Шишова РАН, лаборатория геохимии,  
гл. научн. сотр., проф., д-р хим. наук; e-mail: leonov@ocean.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,  
кафедра океанологии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

<sup>3</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, лаборатория волновой динамики и прибрежных течений,  
проф., д-р техн. наук; e-mail: vpishchnik@rambler.ru

<sup>4</sup> Сахалинский государственный университет, учебно-исследовательская лаборатория химико-биологических исследований, зав. лаб., канд. биол. наук; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

Для вод залива Анива с помощью CNPSi-модели воспроизведено внутригодовое изменение концентраций растворенного  $O_2$  в пяти выделенных в заливе районах для определения рисков в размещении марикультурных ферм. Район 1 резко отличается от других районов (наиболее мелководный и распресненный), район 2 характеризует выраженный водообмен с районами 3 и 4, весной в этих районах формируются и выделяются два слоя, летом толща воды однородна; район 3 имеет свободный водообмен с открытыми водами пролива Лаперуза; район 4 – относится к глубоководной части залива, его отличительная особенность – характерное опускание вод в центре антициклонического круговорота и максимальное заглубление термоклина (до 60–70 м). Район 5 расположен вдоль западного побережья Тонино-Анивского п-ова и характеризуется наличием постоянного апвеллинга вод в безледный период, что отчетливо выражается пониженными значениями температуры воды. Расчет показал, что в районах, пригодных для размещения марикультурных ферм, прибрежные воды обеспечены кислородом в течении всего года. Анаэробные условия складываются только в самых глубоководных местах залива в весенний период. В заливе Анива дополнительным источником кислорода служат естественные заросли макрофитов, среди которых по биомассе и занимаемой площади доминирует сахарина японская (*Saccharina japonica*). Ежегодно только сахарина японская фиксирует в своей биомассе не менее 1,2 тыс. т С и поставляет не менее 3,1 тыс. т  $O_2$ . Но, в отличие от выращенной биомассы, наличная биомасса всех макрофитов останется в системе, будет разрушаться в процессе жизненного цикла и при этом на окисление будет расходоваться кислород, а накопленный в биомассе углерод вновь вернется в быстрый круговорот, за исключением той доли, которая будет снесена в центральную глубоководную часть залива, где будет медленно разлагаться почти в анаэробных условиях. В заливе возможно дополнительно размещать водорослевые плантации, которые могут ежегодно фиксировать до 49,5 тыс. т С, при этом дополнительно выделяя до 132 тыс. т  $O_2$ . Полученные модельные оценки могут являться точкой отсчета для определения «базовой линии» по содержанию растворенного кислорода и составления балансовых уравнений потоков газов в системе «океан – атмосфера» в заливе Анива до начала развития морских водорослевых плантаций, выполняющих попутно роль карбоновых ферм.

**Ключевые слова:** залив Анива, кислород, CNPSi-модель, марикультура, карбоновый полигон, баланс углерода и кислорода

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.7

## ВВЕДЕНИЕ

Мировая климатическая повестка и поиск путей борьбы с изменениями климата все больше фокусируют внимание на морских экосистемах, включая прибрежные заросли макрофитов, называемые Blue Forests [Out of the blue..., 2020; Norwegian Blue..., 2022]. Помимо увеличения содержания в атмосфере  $CO_2$  прогнозируется, что запасы растворенного кислорода в Мировом океане сократятся на 1–7% к 2100 г. [Keeling et al., 2010] из-за потепления океана, уменьшения вентиляции глубоких глубин океана и эвтрофикации прибрежных вод [Rabalais et al., 2014, Claret et al., 2018].

Текущее поглощение парниковых газов может быть существенно ускорено путем создания дополнительной биомассы макрофитов в марикультуре. По оценкам С. Duarte с соавторами, выращенные макроводоросли сейчас поглощают только около 6% от поглощения природными популяциями, однако, исходя из того что во всем мире площадь под морские плантации не более 0,04% от естественных местообитаний, потенциал морских карбоновых ферм становится очевиден [Duarte et al., 2017; 2022]. Хотя, безусловно, в развитии таких марикультурных карбоновых ферм, где наряду с традиционными методами использования выращенных

водорослей в еду будет налажена переработка углерода на долговременное хранение, есть много ограничений [Troell et al., 2022].

Залив Анива (Охотское море) является акваторией с благоприятными условиями для развития марикультуры ценных видов гидробионтов. По оценке С.И. Масленникова, площадь прибрежной акватории, пригодной для интенсивной марикультуры морских беспозвоночных, без учета открытых акваторий здесь составляет 177,4 тыс. га, а суммарная продуктивность только от марикультуры двустворчатых моллюсков может достигать 295,8 тыс. т [Maslennikov, 2008]. Урожай ламинарии японской в мировой практике культивирования может составлять 200–300 т сырой массы/га в год [Maslennikov, 2008]. В условиях Приморья урожай в двухгодичном цикле достигает 100 т/га [Понырко, Крупнова, 2021].

В заливе существуют природные популяции практически всех востребованных в марикультуре объектов. Продуктивность и успешность марикультурного хозяйства зависит от комплекса абиотических и биотических факторов окружающей среды (ледового режима, температуры, скорости и направления течений, режима биогенных элементов, местной фауны и флоры и т. д.). Для водорослевой фермы важен режим биогенных веществ, температурный, волновой режим, а для фермы, где выращивают беспозвоночных, в первую очередь необходимо хорошее обеспечение кислородом. Критическое значение содержания кислорода в воде, ниже которого возможна гибель гидробионтов, составляет 6 мг/дм<sup>3</sup> [Приказ..., 2016]. Совместное выращивание организмов разных трофических уровней по типу интегрированной мультитрофной аквакультуры (Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA)) дает дополнительные преимущества для поглощения углерода, а также регулирования кислородного режима и биогенной нагрузки на акваторию [Mahmood et al., 2016].

Таким образом, залив Анива может стать морским карбоновым полигоном, где экспериментальным путем возможно оценить дополнительные объемы поглощения углекислого газа при интенсивной мультитрофной марикультуре (например, несколько видов водорослей и двустворчатых моллюсков) в сравнении с природным местообитанием этих видов.

В то же время берега залива – это довольно хорошо освоенная человеком зона. В самом заливе происходит интенсивная практическая реализация различных проектов, в том числе транспортировка нефти и газа крупными танкерами, дампинг грунта после строительства завода СПГ, дноуглубления портов, что создает потенциальную угрозу загряз-

нения прибрежных морских акваторий. Только при строительстве завода СПГ в Пригородном было сброшено в залив Анива более 2 млн м<sup>3</sup> грунта [Афанасьев, 2018], что явилось одной из причин снижения численности популяции камчатского краба [Низяев, 2022].

Одновременно здесь традиционно ведется активная добыча морских биоресурсов. Здесь же в весенне-летний период нагуливается молодь тихоокеанских лососей, скатившаяся с естественных нерестилищ и выпущенная с лососевых рыбозаводных заводов, а в летне-осенний период проходят на речные нерестилища взрослые лососи. Загрязнение морской среды нарушает естественное развитие экологических процессов трансформации органических веществ (углеродный баланс), формирования биомассы фито- и зоопланктона как основы пищевой цепи (снижает интенсивность карбоновой помпы). Загрязнение морской среды существенно снижает биопотенциал секвестрации углерода, а также создает риски гибели гидробионтов в марикультурных хозяйствах и качеству их продукции.

Очевидно, что для залива Анива как акватории с высоким потенциалом развития морских марикультурных ферм актуальны проблемы мониторинга качества среды, оценки антропогенного воздействия на морскую среду и обитающих в ней гидробионтов при анализе и исследовании сохранения условий для функционирования возобновляемых морских биоресурсов.

В связи с изложенным выше чрезвычайно важно использовать методологию математического моделирования для исследования современного состояния морской среды залива Анива как модельного карбонового полигона и оценки возможности развития процессов самоочищения.

Цель статьи – исследовать изменчивость концентрации растворенного кислорода в заливе Анива как основного показателя качества среды для развития марикультуры и потоков газов по результатам современных исследований и применения гидроэкологического моделирования.

Для понимания особенностей распределения показателей состояния морской среды в заливе Анива решались следующие задачи:

- оценить возможность применения CNPSi-модели для изучения особенностей распределения растворенного кислорода в заливе Анива как базовой линии для дальнейшей оценки вклада водорослевых плантаций в газовые потоки;

- оценить пространственно-временное распределение концентраций растворенного кислорода на акватории залива Анива и возможные риски при размещении марикультурных ферм.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования динамики концентрации растворенного кислорода в водах залива Анива использовалась гидроэкологическая CNPSi-модель [Леонов, Сапожников, 1997; Леонов и др., 2012]. Эта модель описывает взаимосвязанные биогидрохимические циклы азота (N), фосфора (P) и кремния (Si), а также трансформацию растворенного органического углерода (DOC) и режим кислорода ( $O_2$ ) в двуслойной водной экосистеме. CNPSi-модель может применяться для изучения условий функционирования водных экосистем, так как учитывает взаимодействие природных и антропогенных факторов и отражает их общее влияние на водную среду. CNPSi-модель рассчитывает динамику концентраций DOC,  $O_2$ , N-, P-, Si-содержащих органических и минеральных веществ при их биотрансформации в водной среде сообществом водных микроорганизмов и при развитии процессов обмена веществ на границах вода – дно, вода – воздух, водоем – река, а также при переносе веществ водными массами через границы выделенных акваторий.

В CNPSi-модели используются следующие соединения P, N и Si в водной среде: детритные формы P, N, Si; растворенные неорганические и органические формы P, N и Si; минеральные формы N – аммонийный N, нитритный N, нитратный N; мочевины N, свободный азот ( $N_2$ ) и органический углерод (C). Модель также включает компоненты соединений биогенных элементов (C, N, P) в донных отложениях и растворенные газы.

Биотрансформация соединений органогенных элементов в модели осуществляется сообществом микроорганизмов: гетеротрофные бактерии потребляют органические соединения и в процессе метаболизма образуют пул минеральных веществ; бактерии вида *Nitrosomonas* потребляют аммоний и выделяют в среду нитриты; бактерии вида *Nitrobacter* потребляют нитриты и выделяют в среду нитраты; фитопланктон, а также макрофиты утилизируют минеральные вещества и формируют запас органических веществ в водной среде; зоопланктонные организмы регулируют динамику организмов сообщества и своей активностью влияют на развитие продукционно-деструкционных процессов. В модели заложена возможность трансформации загрязняющих веществ, в частности нефтепродуктов и фенола, соответственно нефте- и фенолоокисляющими бактериями.

Входными данными для модели, помимо переносов воды между районами и между верхним и нижним слоями, служат глубина залегания термоклина, температура воды в верхнем и нижнем слоях, освещенность, фотопериод и прозрачность. Поступление биогенных веществ с речным стоком в

залив Анива учитывалось только для района 1. Бралась среднемесячные среднемноголетние данные. Моделирование проводилось для всего годового цикла с шагом по времени  $\Delta t = 0,1$  сут.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модель CNPSi относится к типу боксовых моделей и поэтому для ее применения необходимо выделить отдельные районы залива Анива и задать на их границах соответствующие переносы воды. На основе расчетов для каждого района можно вычислить временную изменчивость тех или иных параметров, рассчитываемых моделью.

Выполненные исследования [Пищальник, Бобков, 2000; Pishchal'nik, Leonov, 2003; Pishchal'nik et al., 2005] показали, что океанологические процессы в заливе Анива имеют пространственную неоднородность. При районировании залива Анива выделены районы с близкими условиями по термохалинной структуре и циркуляции вод, а также особенности годового хода температуры воды в поверхностном слое на стандартных станциях и сезонный характер пространственного распределения планктонных организмов [Брагина, 2002]. В результате для дальнейших исследований залива Анива в нем было выделено пять районов (рис. 1).

Самый мелководный и наиболее распресненный район в заливе – район 1. Здесь по всем показателям наблюдаются наиболее резкие отличия от других районов. Район 2 расположен южнее первого и характеризуется четко выраженным водообменом с соседними районами 3 и 4. Весной здесь отчетливо прослеживается термоклин и выделяются два слоя. Затем вся толща воды становится однородной. Район 3 имеет свободный водообмен с открытой частью пролива Лаперуза, что непосредственно влияет на гидролого-гидрохимический режим данной акватории. Район 4 – центральная и наиболее глубоководная часть залива Анива. Отличительная особенность его режима – характерное опускание вод в центре антициклонического круговорота и максимальное заглубление термоклина (до горизонта 60–70 м). Район 5 расположен вдоль западного побережья Тонино-Анивского п-ова. Характеризуется наличием апвеллинга вод в безледный период, что отчетливо выражается пониженными значениями температуры воды.

Анализ результатов моделирования показал, что концентрация растворенного  $O_2$  от зимы к весне возрастает и в апреле повсеместно достигает около 14 мг  $O_2$ /л. В конце апреля в районах 3 и 4 отмечено резкое снижение содержания  $O_2$  в поверхностном слое (до <1 мг  $O_2$ /л) за счет того, что в указанных районах весной резко сокращается его содержание



в придонных слоях. Однако это характерно только для наиболее глубоководных участков, где создаются почти анаэробные условия за счет слабой конвекции и где размещение марикультурных хозяйств невозможно.

Небольшие изменения отмечены и в водах района 1: в августе концентрация растворенного  $O_2$  здесь составляет 9,2 мг  $O_2$ /л, в сентябре после промежуточного максимума – 10,5, в октябре вновь снижается до 9,1 и к концу года возрастает до 10,1 мг  $O_2$ /л. В районе 2 августовский минимум

$O_2$  (9,2 мг  $O_2$ /л) сменяется постепенным увеличением его концентрации к концу года до 10,9 мг  $O_2$ /л. В районах 3–5 минимум  $O_2$  летом составляет 10,6–10,8 мг  $O_2$ /л, к концу года его содержание здесь возрастает до 12,4–12,6 мг  $O_2$ /л (рис. 2). Необходимо отметить, что концентрации растворенного кислорода в зимний период в районах 3 и 5, полученные в результате моделирования, не согласуются с данными наблюдений. По всей видимости, это связано с неточным заданием переносов воды на границах этих районов.

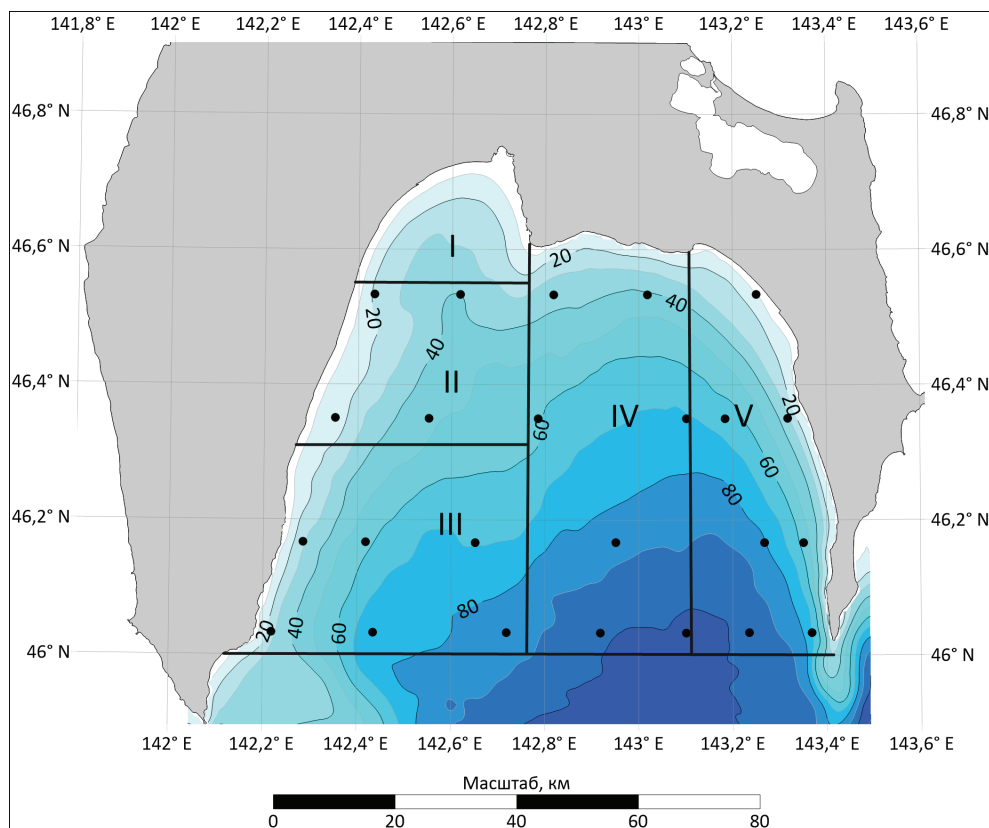


Рис. 1. Районы залива Анива, используемые в модели CNPSi. Точками показано расположение стандартных океанографических станций

Fig. 1. Patches of the Aniva Bay used in CNPSi model. The dots indicate the location of standard oceanographic stations

Таким образом, прибрежные воды всех выделенных районов залива Анива обеспечены кислородом на протяжении всего года, что делает их пригодными для размещения марикультурных хозяйств. Если на всей площади акватории (177,4 тыс. га), пригодной для организации марикультурных хозяйств, разместить водорослевые плантации из сахарины японской, по верхней оптимистичной оценке дающие урожай около 100 т/га ежегодно (или в пересчете на сухую массу около 10 т/год), то урожай только этого вида может достигать 1,8 млн т сырой массы в год (ориентировочно 180 тыс. т на сухую массу). Конечно, полученная величина может рас-

считываться как ориентир, на котором в дальнейшем мы будем строить модельные расчеты по приемной емкости залива Анива к водорослевым плантациям. При содержании углерода в сухой массе *Saccharina japonica* в среднем 27,5% [Gao et al., 2022] выращенная масса водорослей будет содержать порядка 49,5 тыс. т С. Учитывая соотношение C:N:P = 183:9:1 в тканях сахарины японской [Atkinson, Smith, 1983], можно рассчитать, что в процессе роста сахарина утилизировала 2,5 тыс. т минерального азота и 270 т минерального фосфора.

Для бентосных водорослей после получения данных о соотношениях углерода, азота и фосфора

было предложено следующее балансовое уравнение фотосинтеза, позволившее существенно изменить представление о величине первичной продукции бентосных макрофитов в сторону ее увеличения [Atkinson, Smith, 1983]:

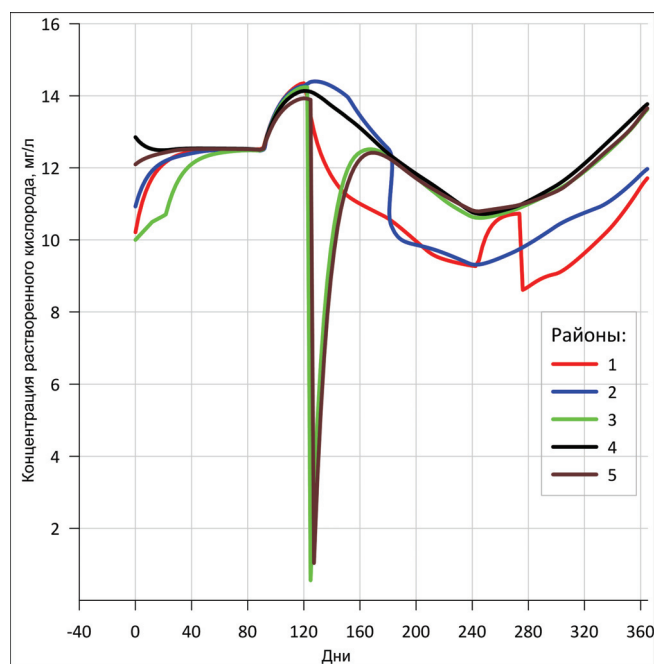
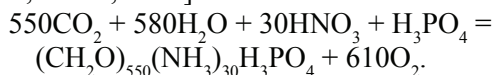


Рис. 2. Изменчивость концентраций  $\text{O}_2$  для районов 1–5 залива Анива по результатам моделирования  
Fig. 2. Variability of  $\text{O}_2$  concentrations for Patches 1–5 of the Aniva Bay based on modelling results

Отмечается увеличение содержания растворенного кислорода в слое 0–3 м в местах культивирования водорослей на 21%, исходя из соотношения, что на каждую тонну зафиксированного углерода (при условии удаления и переработки биомассы для длительного хранения) выделяется 2,67 т кислорода (без учета его поглощения в темное время суток на дыхание) [Gao et al., 2022]. По подсчетам верхнего уровня оптимизма выращенная биомасса (при полной утилизации для долговременного хранения и исключения возможности попадания в круговорот органического вещества в заливе) сможет дать дополнительно 132 тыс. т  $\text{O}_2$ .

Теперь рассмотрим роль естественных поселений макрофитов в обеспечении кислородом прибрежных вод.

В морских экосистемах огромную роль в потоках растворенных газов играют организмы. В открытых районах моря главенствующую роль в насыщении воды  $\text{O}_2$  и поглощении  $\text{CO}_2$  играют микроорганизмы, в прибрежных районах — это и макрофиты. И леса водорослей и луга морских трав значительно влияют как на вертикальные, так и на

горизонтальные векторы газовых потоков. Хорошо известно, что в зарослях макрофитов даже летом при высоких температурах воды и низком содержании биогенных элементов, препятствующих развитию фитопланктона, содержание кислорода всегда выше предела насыщения. Хотя поглощение  $\text{O}_2$  на дыхание той же zostеры в естественных поселениях может даже превышать выделение  $\text{O}_2$  при фотосинтезе [Rasmussen et al., 2017].

В заливе Анива в прибрежной зоне произрастает 86 видов макрофитов, преимущественно до глубины 25 м. Морских трав отмечено три вида (*Zostera marina*, *Z. asiatica*, *Phyllospadix iwataensis*). Травы отмечены на участках с песчаными и песчано-галечниковыми, скалисто-каменистыми донными грунтами. Они могут составлять как монодоминантные луга, так и участвовать в сложении многовидового фитоценоза. В разных биотопах средняя биомасса трав может достигать 13,3–477,7 г/м<sup>2</sup> [Щукина и др., 2003]. В среднем для залива можно принять величину 206 г/м<sup>2</sup>.

Среди водорослей доминирует по биомассе бурая водоросль сахарина японская, площадь зарослей которой в заливе составляет 15,25 км<sup>2</sup>, а общая биомасса 42,41 тыс. т [Аминина и др., 2014]. Удельная биомасса сахарины изменялась в диапазоне от 0,001 до 12,3 кг/м<sup>2</sup>, в среднем по заливу составляет 2,035 кг/м<sup>2</sup>, что на порядок больше, чем средняя биомасса морских трав. Основные места произрастания морских трав и районы добычи сахарины японской в заливе Анива представлены на рис. 3. Наиболее плотные скопления сахарины отмечены в северной части залива (с. 3-я Падь — с. Озерский), где сосредоточено до 83% промыслового запаса этого вида для залива [Аминина и др., 2014].

Эта огромная растительная биомасса, несомненно, влияет на баланс углерода и кислорода в прибрежных водах. Ежегодно только сахарина японская фиксирует в своей биомассе не менее 1,2 тыс. т С и поставляет не менее 3,1 тыс. т  $\text{O}_2$ . Но в отличие от выращенной биомассы, наличная биомасса всех макрофитов останется в системе, будет разрушаться в процессе жизненного цикла и при этом на окисление будет расходоваться кислород, а накопленный в биомассе углерод вновь вернется в быстрый круговорот, за исключением той доли, которая будет снесена в центральную глубоководную часть залива, где будет медленно разлагаться почти в анаэробных условиях.

Таким образом, полученные модельные оценки могут являться точкой отсчета для определения базовой линии по содержанию растворенного кислорода и составления балансовых уравнений потоков газов в системе «океан — атмосфера» в заливе Анива до начала развития морских водорослевых плантаций, выполняющих попутно роль карбоновых ферм.

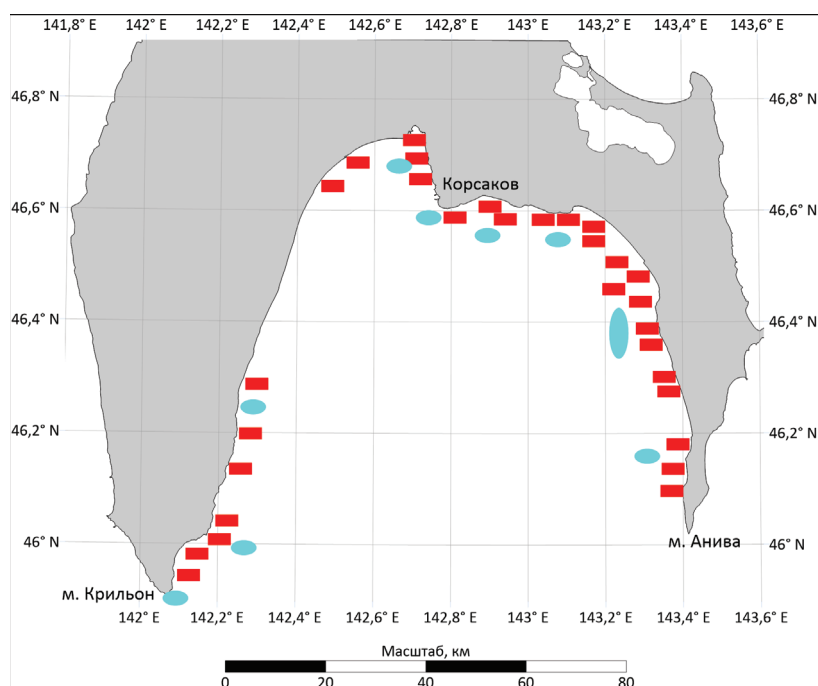


Рис. 3. Места произрастания морских трав в заливе Анива – прямоугольники [Щукина и др., 2003] и мест добычи сахарины японской – овалы [Аминина и др., 2014]

Fig. 3. Places of sea grasses growth in the Aniva Bay are indicated by red rectangles [Shchukina et al., 2003]. The sites of extraction of Japanese saccharin are indicated by blue ellipses [Aminina et al., 2014]

### ВЫВОДЫ

Для вод залива Анива с помощью CNPSi-модели воспроизведено внутригодовое изменение концентраций растворенного  $O_2$  в пяти выделенных в заливе районах для определения рисков в размещении марикультурных ферм. Район 1 резко отличается от других (наиболее мелководный и распресненный), район 2 характеризует выраженный водообмен с районами 3 и 4, весной в этих районах формируются и выделяются два слоя, летом толща воды однородна; район 3 имеет свободный водообмен с открытыми водами пролива Лаперуза; район 4 относится к глубоководной части залива, его отличительная особенность – характерное опускание вод в центре антициклонического круговорота и максимальное заглубление термоклина (до 60–70 м). Район 5 расположен вдоль западного побережья Тонино-Анивского п-ова и характеризуется наличием постоянного апвеллинга вод в безледный период, что отчетливо выражается пониженными значениями температуры воды. Расчет показал, что в районах, пригодных для размещения марикультурных ферм, прибрежные воды обеспечены кислородом в течении всего года. Анаэробные условия складываются только в самых глубоководных местах залива в весенний период.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «СахГУ» по теме «Углеродный баланс биоморфолитосистем побережья и прилегающих морских акваторий окраинных морей Дальнего Востока (FEFF-2022-0027)».

В заливе Анива дополнительным источником кислорода служат естественные заросли макрофитов, среди которых по биомассе и занимаемой площади доминирует сахарина японская (*Saccharina japonica*). Ежегодно только сахарина японская фиксирует в своей биомассе не менее 1,2 тыс. т С и поставляет не менее 3,1 тыс. т  $O_2$ . Но в отличие от выращенной биомассы, наличная биомасса всех макрофитов останется в системе, будет разрушаться в процессе жизненного цикла и при этом на окисление будет расходоваться кислород, а накопленный в биомассе углерод вновь вернется в быстрый круговорот, за исключением той доли, которая будет снесена в центральную глубоководную часть залива, где будет медленно разлагаться почти в анаэробных условиях.

В заливе возможно дополнительно размещать водорослевые плантации, которые могут ежегодно фиксировать до 49,5 тыс. т С, при этом дополнительно выделяя до 132 тыс. т  $O_2$ . Полученные модельные оценки могут являться точкой отсчета для определения «базовой линии» по содержанию растворенного кислорода и составления балансовых уравнений потоков газов в системе «океан – атмосфера» в заливе Анива до начала развития морских водорослевых плантаций, выполняющих попутно роль карбоновых ферм.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аминина Н.М., Вишневецкая Т.И., Галанин Д.А. и др. Характеристика промысловых запасов Сахарины японской в заливе Анива (Охотское море) // Изв. ТИНРО. 2014. Т. 178. С. 116–123.
- Афанасьев В.В. Строение и развитие берегов контактной зоны умеренных и субарктических морей северной Пацифики: дис. ... д-ра геогр. наук. Южно-Сахалинск, 2018. 345 с.
- Брагина И.Ю. Сезонная и межгодовая изменчивость зоопланктона по результатам исследований 1995–1999 гг. в проливе Лаперуза (Соя) и прилегающих водах // Труды СахНИРО. 2002. Т. 4. С. 48–69.
- Леонов А.В., Пищальник В.М., Заринов О.М. Моделирование природных процессов: система отображения результатов расчетов на CNPSi-модели. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2012. 148 с.
- Леонов А.В., Сапожников В.В. Биогидрохимическая модель трансформации органогенных веществ и ее использование для расчета первичной продукции в экосистеме Охотского моря / Комплексные исследования Охотского моря. М.: ВНИРО, 1997. С. 143–166.
- Низяев С.А. Экологические аспекты многолетнего распределения камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* в заливе Анива (о. Сахалин) // Геосистемы переходных зон. 2022. № 6(4). С. 388–404. DOI: 10.30730/gtrz.2022.6.4.388-404.
- Пищальник В.М., Бобков А.О. Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2000. Ч. I. 174 с.
- Поньрко О.А., Крупнова Т.Н. Выращивание ламинарии японской (*Saccharina japonica*) из цеховой рассады // Материалы VI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли» (Владивосток, 27 ноября 2020 года). Владивосток: Дальневосточный гос. тех. рыбохозяйственный ун-т, 2021. С. 120–124.
- Щукина Г.Ф., Галанин Д.А., Балконская Л.А. и др. Структура и распределение прибрежных донных сообществ залива Анива // Труды СахНИРО. 2003. Т. 5. С. 3–24.
- Atkinson M., Smith S.V. C : N : P ratios of benthic marine plants, *Limnol. Oceanogr.*, 1983, vol. 28(3), p. 568–574, DOI: 10.4319/LO.1983.28.3.0568.
- Claret M., Galbraith E.D., Palter J.B. et al. Rapid coastal deoxygenation due to ocean circulation shift in the north-west Atlantic, *Nat. Clim. Change*, 2018, vol. 8, p. 868–72.
- Duarte C.M., Wu J., Xiao X. et al. Can Seaweed Farming Play a Role in Climate Change Mitigation and Adaptation? *Front. Mar. Sci.*, 2017, vol. 4:100, DOI: 10.3389/fmars.2017.00100.
- Duarte C.M., Gattuso J.-P., Hancke K. et al. Global estimates of the extent and production of macroalgal forests, *Global Ecol Biogeogr.*, 2022, vol. 31, p. 1422–1439, DOI: 10.1111/geb.13515.
- Gao G., Gao L., Jiang M. et al. The potential of seaweed cultivation to achieve carbon neutrality and mitigate deoxygenation and eutrophication, *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17(014018), DOI: 10.1088/1748-9326/ac3fd9.
- Keeling R.F., Körtzinger A., Gruber N. Ocean deoxygenation in a warming world, *Ann. Rev. Mar. Sci.*, 2010, vol. 2, p. 199–229.
- Mahmood T., Fang J., Jiang Z., Zhang J. Carbon and nitrogen flow, and trophic relationships, among the cultured species in an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) bay, *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, vol. 8, p. 207–219.
- Maslennikov S.I. Marine Biological Resources in the Far Eastern Coast: Their Rational Use from Ecological and Economic Viewpoints, *Energy and environment in Slavic Eurasia: toward the establishment of the network of environmental studies in the Pan-Okhotsk region*, Sapporo, Slavik Research Center, Hokkaido University, 2008, p. 89–125.
- Norwegian Blue Forest Network Annual Report 2021, GRID-Arendal, Institute for Marine Research, Norwegian Institute for Water Research, 2022.
- Out of the blue: The value of seagrasses to the environment and to people, United Nations Environment Programme, 2020, UNEP, Nairobi, 96 p.
- Pishchal'nik V.M., Leonov A.V. Studying the Ecosystem Functioning Conditions in Aniva Bay-La Perouse Strait, *Water Resources*, 2003, vol. 30, no. 5, p. 569–588, DOI: 10.1023/A:1025741516922.
- Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V. Thermohaline analysis of the La Perouse Strait water, *Water Resources*, 2005, vol. 32, no. 1, p. 13–22, DOI: 10.1007/s11268-005-0003-6.
- Rabalais N.N., Cai W.J., Carstensen J. et al. Eutrophication-driven deoxygenation in the coastal ocean, *Oceanography*, 2014, vol. 27, p. 172–83.
- Rasmusson L.M., Lauritano C., Procaccini G. et al. Respiratory oxygen consumption in the seagrass *Zostera marina* varies on a diel basis and is partly affected by light, *Mar. Biol.*, 2017, vol. 164(6), 140, DOI: 10.1007/s00227-017-3168-z.
- Troell M., Henriksson P.J.G., Buschmann A.H. et al. Farming the Ocean – Seaweeds as a Quick Fix for the Climate? *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2022, DOI: 10.1080/23308249.2022.2048792.

## Электронный ресурс

Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». 151 с. URL: [https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz\\_minсельхозa\\_rossii\\_ot\\_13122016\\_n\\_552\\_ob\\_utverzhdenii\\_pdk.pdf?ysclid=lmawswv43c875783036](https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz_minсельхозa_rossii_ot_13122016_n_552_ob_utverzhdenii_pdk.pdf?ysclid=lmawswv43c875783036) (дата обращения 12.04.2022).

Поступила в редакцию 11.01.2023

После доработки 24.06.2023

Принята к публикации 27.07.2023

# MODELING THE DYNAMICS OF DISSOLVED OXYGEN CONCENTRATION IN WATERS OF THE ANIVA BAY (THE SEA OF OKHOTSK)

A.V. Leonov<sup>1</sup>, V.S. Arkhipkin<sup>2</sup>, V.M. Pishchalnik<sup>3</sup>, E.M. Latkovskaya<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Laboratory of Geochemistry, Chief Scientific Researcher, Professor; D.Sc. in Chemistry; e-mail: leonov@ocean.ru

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Department of Oceanology, Associate Professor, Ph.D. In Geography; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

<sup>3</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Laboratory of Wave Dynamics and Coastal Currents, Professor; D.Sc. in Engineering; e-mail: vpishchalnik@rambler.ru

<sup>4</sup> Sakhalin State University, Laboratory of chemical-biological research, Head of the Laboratory, Ph.D. in Biology; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

To determine the risks for mariculture farms, the intra-annual change of dissolved O<sub>2</sub> concentration was simulated for five zones in the Aniva Bay using the CNPSi model. Zone 1 differed sharply from other zones as the most shallow and freshened. Zone 2 is characterized by a pronounced water exchange with Zone 3 and Zone 4: during spring two layers were formed and stood out in these zones, in the summer the water column was homogeneous. Zone 3 has free water exchange with the open waters of the La Perouse Strait. An outstanding feature of Zone 4, in the deep-water part of the bay, was a distinctive subsidence of waters in the centre of the anticyclonic circulation and the maximum thermocline depth (up to 60–70 m). Zone 5 extends along the western coast of the Tonino-Aniva Peninsula and is characterized by the constant upwelling of waters during the ice-free period, which is clearly expressed by lower water temperatures. The calculation showed that in the areas suitable for mariculture farms coastal waters were provided with oxygen throughout the year. Anaerobic conditions developed in spring only in the deepest parts of the bay. An additional source of oxygen in the Aniva Bay is natural thickets of macrophytes, among which the Japanese saccharin (*Saccharina japonica*) dominates in terms of biomass and area. Annually, Japanese saccharin itself absorbed at least 1200 tons of C in its biomass and supplied at least 3100 tons of O<sub>2</sub>. Unlike the artificially grown biomass, the biomass of all macrophytes would remain in the system and be destroyed during the life cycle, and the oxygen would be consumed for oxidation. The carbon accumulated in the biomass would again return to the rapid cycle, with the exception of the amount transported to the deep central part of the bay, where it would slowly decompose under nearly anaerobic conditions. It would be possible to place additional algae plantations in the bay, which could absorb up to 49 500 tons of C annually, while supplying up to 132 000 tons of O<sub>2</sub>. The obtained model estimates could be a starting point for determining the “baseline” of the content of dissolved oxygen and compiling balance equations for gas flows in the ocean-atmosphere system in the Aniva Bay before the development of seaweed plantations, which simultaneously act as carbon farms.

**Keywords:** the Aniva Bay, oxygen, CNPSi model, sea farming, carbonic landfill, carbon and oxygen balance

**Acknowledgements.** The work was carried out under the state task of the Sakhalin State University “Carbon balance of biomorpholithological systems of the coast and adjacent water areas of the open seas of the Far East” (FEFF-2022-0027).

## REFERENCES

- Afanas'ev V.V. *Stroenie i razvitie beregov kontaktnoi zony umerennykh i subarkticheskikh morei severnoi Patsifiki* [Structure and development of coasts of the contact zone between the boreal and subarctic seas of the Northern Pacific], Ph.D. Thesis in Geography, Yuzhno-Sakhalinsk, 2018, 345 p. (In Russian)
- Aminina N.M., Vishnevskaya T.I., Galanin D.A., Repnikova A.R., Guruleva O.N. Kharakteristika promyslovyykh zapasov Sakhariny yaponskoi v zalive Aniva (Okhotskoe more) [Description of *Saccharina japonica* commercial stock in the Aniva Bay (the Okhotsk Sea)], *Izv. TINRO*, 2014, vol. 17, p. 116–123. (In Russian)
- Atkinson M., Smith S.V. C : N : P ratios of benthic marine plants, *Limnol. Oceanogr.*, 1983, vol. 28(3), p. 568–574, DOI: 10.4319/LO.1983.28.3.0568.
- Bragina I.Yu. Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' zooplanktona po rezul'tatam issledovaniy 1995–1999 gg. v prolyve Laperuza (Soya) i prilozhashchikh vodakh [Seasonal and interannual variability of zooplankton according to the results of 1995–1999 studies in the Laperouse Strait (Soya) and adjacent waters], *Trudy SakhNIRO*, 2002, vol. 4, p. 48–69. (In Russian)
- Claret M., Galbraith E.D., Palter J.B. et al. Rapid coastal deoxygenation due to ocean circulation shift in the north-west Atlantic, *Nat. Clim. Change*, 2018, vol. 8, p. 868–72.
- Duarte C.M., Gattuso J.-P., Hancke K. et al. Global estimates of the extent and production of macroalgal forests, *Global Ecol Biogeogr.*, 2022, vol. 31, p. 1422–1439, DOI: 10.1111/geb.13515.
- Duarte C.M., Wu J., Xiao X. et al. Can Seaweed Farming Play a Role in Climate Change Mitigation and Adaptation? *Front. Mar. Sci.*, 2017, vol. 4:100, DOI: 10.3389/fmars.2017.00100.
- Gao G., Gao L., Jiang M. et al. The potential of seaweed cultivation to achieve carbon neutrality and mitigate deoxygenation and eutrophication, *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17(014018), DOI: 10.1088/1748-9326/ac3fd9.

- Keeling R.F., Körtzinger A., Gruber N. Ocean deoxygenation in a warming world, *Ann. Rev. Mar. Sci.*, 2010, vol. 2, p. 199–229.
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M., Zaripov O.M. *Modelirovanie prirodnnykh protsessov: sistema otobrazheniya rezul'tatov raschetov na CNPSi-modeli* [Modeling of natural processes. A system for displaying calculation results on a CNPSi model], Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin State University Publ., 2012, 148 p. (In Russian)
- Leonov A.V., Sapozhnikov V.V. [Biohydrochemical Model of Organogenic Matter and its Use for the Calculation of Primary Production in the Sea of Okhotsk Ecosystem], *Kompleksnye issledovaniya Okhotskogo moray* [Complex studies of the Okhotsk Sea], Moscow, VNIRO Publ., 1997, p. 143–166. (In Russian)
- Mahmood T., Fang J., Jiang Z., Zhang J. Carbon and nitrogen flow, and trophic relationships, among the cultured species in an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) bay, *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, vol. 8, p. 207–219.
- Maslennikov S.I. Marine Biological Resources in the Far Eastern Coast: Their Rational Use from Ecological and Economic Viewpoints, *Energy and environment in Slavic Eurasia: toward the establishment of the network of environmental studies in the Pan-Okhotsk region*, Sapporo, Slavik Research Center, Hokkaido University, 2008, p. 89–125.
- Norwegian Blue Forest Network Annual Report 2021*, GRID-Arendal, Institute for Marine Research, Norwegian Institute for Water Research, 2022.
- Out of the blue: The value of seagrasses to the environment and to people*, United Nations Environment Programme, 2020, UNEP, Nairobi, 96 p.
- Patin S.A. *Ekologicheskie problemy osvoeniya neftegazovykh resursov morskogo shel'fa* [Ecological problems of the development of oil and gas resources of the offshore shelf], Moscow, VNIRO Publ., 1997, 350 p. (In Russian)
- Patin S.A. *Neft' i ekologiya kontinental'nogo shel'fa* [Oil and ecology of the continental shelf], Moscow, VNIRO Publ., 2001, 247 p. (In Russian)
- Pishchal'nik V.M., Bobkov A.O. *Okeanograficheskii atlas shel'fovoi zony ostrova Sakhalin* [Oceanographic atlas of the Sakhalin Island shelf zone], Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin State University Publ., 2000, part I, 174 p. (In Russian)
- Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V. Thermohaline analysis of the La Perouse Strait water, *Water Resources*, 2005, vol. 32, no. 1, p. 13–22, DOI: 10.1007/s11268-005-0003-6.
- Pishchal'nik V.M., Leonov A.V. Studying the Ecosystem Functioning Conditions in Aniva Bay-La Perouse Strait, *Water Resources*, 2003, vol. 30, no. 5, p. 569–588, DOI: 10.1023/A:1025741516922.
- Ponyrko O.A., Krupnova T.N. [Cultivation of Japanese kelp (*Saccharina japonica*) from workshop seedlings], materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, *Kompleksnye issledovaniya v rybokhozyaistvennoi otrasli* [Complex studies in fishery], Vladivostok, Dal'nevostochnyi gos. Tekh. rybokhozyaistvennyi un-t Publ., 2021, p. 120–124. (In Russian)
- Rabalais N.N., Cai W.J., Carstensen J. et al. Eutrophication-driven deoxygenation in the coastal ocean, *Oceanography*, 2014, vol. 27, p. 172–83.
- Rasmusson L.M., Lauritano C., Procaccini G. et al. Respiratory oxygen consumption in the seagrass *Zostera marina* varies on a diel basis and is partly affected by light, *Mar. Biol.*, 2017, vol. 164(6), 140, DOI: 10.1007/s00227-017-3168-z.
- Shchukina G.F., Galanin D.A., Balkonskaya L.A. et al. Struktura i raspredelenie pribrezhnykh donnykh soobshchestv zaliva Aniva [Structure and distribution of coastal bottom communities of the Aniva Bay], *Trudy SakhNIRO*, 2003, vol. 5, p. 3–24. (In Russian)
- Troell M., Henriksson P.J.G., Buschmann A.H. et al. Farming the Ocean – Seaweeds as a Quick Fix for the Climate? *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2022, DOI: 10.1080/23308249.2022.2048792.
- Web source*
- Prikaz Ministerstva sel'skogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii ot 13 dekabrya 2016 goda № 552 “Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob’ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel’no dopustimyykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob’ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya” [On approval of water quality standards for water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance], URL: [https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz\\_minselk\\_hoza\\_rossii\\_ot\\_13122016\\_n\\_552\\_ob\\_utverzhdenii\\_pdk.pdf?ysclid=lmanwsv43c875783036](https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz_minselk_hoza_rossii_ot_13122016_n_552_ob_utverzhdenii_pdk.pdf?ysclid=lmanwsv43c875783036) (access date 12.04.2022).

Received 11.01.2023

Revised 24.06.2023

Accepted 27.07.2023



## СГОННО-НАГОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ БЕЛОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ 2004–2020 ГГ.

А.Т. Кондрин<sup>1</sup>, А.Д. Кораблина<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии*

<sup>1</sup> *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: alt.kondrin@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Независимый исследователь, канд. геогр. наук; e-mail: jacksparrow91@bk.ru*

На основании данных наблюдений, охватывающих период с 2004 по 2020 г., рассмотрены колебания остаточного уровня Белого моря в синоптическом диапазоне временных масштабов, причем основное внимание уделено нагонам и сгонам. Использованы данные ежедневных наблюдений уровня в ряде пунктов побережья: Сосновец, Северодвинск, Соловки, Кандалакша. Сгоны и нагоны исследованы на основании анализа колебаний остаточного уровня моря (ОУМ), определяющегося путем удаления из данных наблюдений приливной составляющей. Наибольшей дисперсией характеризуются колебания ОУМ в Двинском заливе. В пунктах Сосновец, Соловки колебания ОУМ обладают примерно одинаковой дисперсией, которая существенно ниже, чем в Двинском заливе. Самая низкая дисперсия наблюдается в Кандалакше. Согласно данным, полученным на станциях Северодвинск и Соловки, за рассматриваемый промежуток времени наблюдается заметный рост дисперсии колебаний ОУМ, что указывает на возрастание их интенсивности. Если сравнивать пятилетние периоды, то в Северодвинске средняя дисперсия в 2004–2008 гг. равна 327,3 см<sup>2</sup>, в 2009–2013 гг. – 341,4 см<sup>2</sup>, а в 2016–2020 гг. – 386,8 см<sup>2</sup>. Этот вывод подтверждается и расчетами обеспеченности положительных отклонений ОУМ, а также тем, что количество нагонов высотой не менее 100 см за 12 лет (2004–2015) было всего два, а в пятилетний промежуток (2016–2020) имели место уже пять таких случаев. Описаны семь типов синоптических ситуаций, при которых в Белом море возникали нагоны, причем два из них ранее не рассматривались. На долю западных циклонов различных траекторий приходится 73 (74,5%) из 98 случаев нагонов, рассмотренных в настоящей работе. Наибольшие по величине нагоны в Северодвинске за рассматриваемый период достигали высоты 130 см (22 августа 2018 г.) и 153 см (15 ноября 2011 г.). Значительные сгоны происходят реже, чем нагоны и по своей абсолютной величине, как правило, уступают последним. Сгон 31 января 2005 г. был сильнейшим за весь период 2004–2020 гг. В Северодвинске ОУМ понизился на 123 см ниже среднемесячной отметки, в Соловках – на 112 см.

**Ключевые слова:** приливы, остаточный уровень моря, штормовые нагоны, дисперсия, обеспеченность, синоптические ситуации, межгодовая изменчивость

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.8

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматриваются колебания уровня Белого моря в синоптическом диапазоне, включающем временные масштабы от нескольких суток до нескольких недель [Монин, 1982]. В синоптическом диапазоне наблюдаются значительные колебания остаточного уровня моря (ОУМ), среди которых важнейшую роль играют сгоны и нагоны, возникающие в результате воздействия метеорологических факторов, в основном таких, как изменения приземного атмосферного давления (ПДА) и ветровое воздействие. Белое море относится к приливным морям и в нем вклад приливов в общую дисперсию колебаний уровня доминирует и составляет в Горле 93%, в Кандалакше – 96%, в Двинском заливе – 67%, на Соловецких о-вах – 65%. Однако во многих случаях размах колебаний ОУМ при на-

гонах сопоставим с величиной прилива. Значительные штормовые нагоны в сочетании с приливом нередко приводят к повышению уровня выше критических значений, при которых происходит затопление прибрежных территорий.

Результаты исследований колебаний уровня Белого моря, относящиеся к периоду времени до 1980-х гг., обобщены в монографиях [Filatov et al., 2005; Гидрометеорология..., 1991], а также в работе [Инжебейкин, 2003]. В частности, в этих работах показано, что в Белом море штормовые нагоны нередко носят индуцированный характер. Проходящие над акваториями Баренцева и Белого морей западные циклоны генерируют в акватории Баренцева моря барическую волну, которая затем проникает в Белое море и индуцирует нагон. Результаты ранних исследований представляют собой важный этап в изу-

чении сгонно-нагонных колебаний уровня в Белом море, однако, нуждаются в уточнении и существенном дополнении с привлечением новых данных.

В последние годы синоптические колебания уровня Белого моря по-прежнему привлекали большое внимание исследователей и рассматривались в ряде работ на основании анализа данных наблюдений, а также с привлечением численного моделирования. Штормовые нагоны в устье Северной Двины, приводящие к опасным наводнениям, рассмотрены в [Лебедева и др., 2015; Магрицкий, Скрипник, 2016].

В работах [Korablina et al., 2017; Кондрин, 2016] на основании данных наблюдений и численного моделирования рассмотрены колебания остаточного уровня моря (ОУМ) в синоптическом диапазоне периодов, что позволило более углубленно изучить характеристики и особенности формирования штормовых нагонов в различных синоптических ситуациях. Приводится количественное распределение случаев нагонов по высоте по отдельным месяцам и годам для различных пунктов побережья Белого моря. Оценен вклад ветра, атмосферного давления и ветрового волнения в формирование нагона.

В данной работе рассмотрены сгонно-нагонные колебания уровня Белого моря на основании анализа данных наблюдений в 2004–2020 гг. в ряде пунктов. Следует подчеркнуть, что временные ряды колебаний уровня Белого моря такой продолжительности анализируются впервые. Выделены 98 случаев нагонов, во время которых максимальный подъем ОУМ в Северодвинске относительно среднемесячных значений был не менее 50 см. Такое пороговое значение высоты нагона выбрано потому, что в таких случаях может быть превышена критическая отметка уровня. Нагоны, как и сгоны, рассматриваются в совокупности с формирующими их синоптическими ситуациями. Рассмотрены сценарии развития нагонов при различных синоптических ситуациях. На основании анализа ежечасных рядов уровня продолжительностью 17 лет рассмотрена межгодовая изменчивость колебаний ОУМ в синоптическом масштабе с целью выявления трендов изменения их интенсивности за рассматриваемый промежуток времени.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы данные ежечасных наблюдений уровня моря на станциях Сосновец, Северодвинск и Соловки за 2004–2020 гг., а также в Кандалакше в 2017–2019 гг. (рис. 1). Приливные колебания получены путем гармонического анализа данных наблюдений над уровнем с помощью метода наименьших квадратов [Pawlowicz et al., 2002; Foreman, 1977]. Используемая методика гармонического анализа приливов учитывает 45 астрономи-

ческих и 101 мелководную гармонику приливных колебаний. При этом гармонические постоянные рассчитаны на 95%-ном доверительном уровне. Для получения ОУМ приливная составляющая вычитается из данных наблюдений. Полученные таким образом временные ряды содержат незначительные колебания на приливных частотах. Для полного исключения колебаний на этих частотах был применен фильтр Баттерворта с частотой среза 0,04 ц/ч, соответствующей периоду 25 ч [Emery, Thompson, 2001]. Повышения и понижения ОУМ во время нагонов и сгонов приведены относительно среднемесячных значений. Синоптические ситуации анализировались с помощью карт ПДА, построенных на основании реанализа CFSR и опубликованных на сайте [http://www.wetterzentrale.de]. Статистические расчеты выполнены с помощью пакета MATLAB-программ Statistical Tool Box.

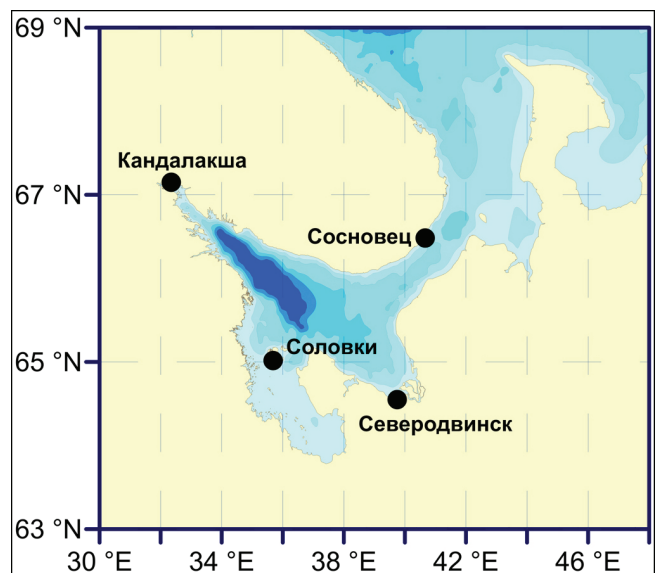


Рис. 1. Расположение пунктов измерений уровня моря

Fig. 1. Location of sea level measurement points

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Сезонные и межгодовые изменения.** В таблице 1 представлено распределение количества рассматриваемых в данной работе 98 нагонов по месяцам за 17-летний период. Согласно полученным данным, за исследуемый период времени в Белом море наибольшее количество нагонов наблюдалось осенью и зимой (по 36%), весной – 18%, летом – 10%. Наибольшее количество нагонов зафиксировано в ноябре (17) и в январе (14), наименьшее – в июне и июле – по три нагона. Аналогичное соотношение распределения нагонов по сезонам и месяцам имело место по данным численного моделирования в 1979–2015 гг. [Kondrin, Korablina, 2017].

Таблица 1

Распределение количества нагонов по месяцам и сезонам в 2004–2020 гг.

| Зима |     |     | Весна |     |     | Лето |     |     | Осень |     |     | Сумма |
|------|-----|-----|-------|-----|-----|------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|
| Дек  | Янв | Фев | Мар   | Апр | Май | Июн  | Июл | Авг | Сен   | Окт | Ноя |       |
| 12   | 14  | 9   | 7     | 6   | 5   | 3    | 3   | 4   | 8     | 10  | 17  | 98    |
| 35   |     |     | 18    |     |     | 10   |     |     | 35    |     |     |       |

Описанная сезонная изменчивость связана с перестройкой атмосферной циркуляции с летней на зимнюю вследствие обострения Исландского минимума зимой и увеличения его площади [Кислов, 2006; Морозова и др., 2022]. Этот процесс сопровождается интенсификацией циклонической деятельности на арктическом атмосферном фронте, который в холодное время года смещается к югу и располагается в полосе широт 73–77° с. ш. на западе Баренцева моря и 67–75° с. ш. в его восточной части [Титкова и др., 2014].

На рис. 2А показана дисперсия колебаний ОУМ, характеризующая интенсивность синоптических колебаний уровня в пунктах Северодвинск, Соловки, Сосновец и Кандалакша. Показанная на рис. 2А дисперсия рассчитана путем осреднения дисперсий колебаний ОУМ, полученных за каждый месяц. Наибольшей дисперсией характеризуются колебания ОУМ в Двинском заливе. В Соловках и Сосновце колебания ОУМ обладают примерно одинаковой дисперсией, которая существенно ниже, чем в Двинском заливе. Самая низкая дисперсия наблюдается в Кандалакше.

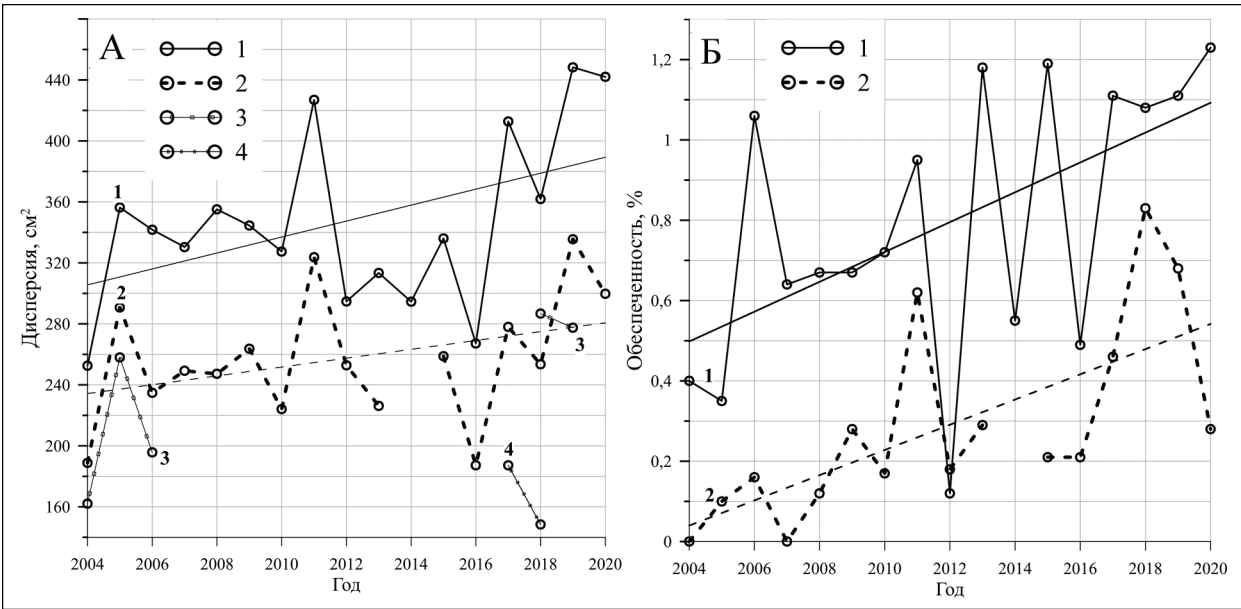


Рис. 2. Статистические характеристики синоптических колебаний уровня:

А – дисперсия синоптических колебаний ОУМ с 2004 по 2020 г.: 1 – Северодвинск; 2 – Соловки, 3 – Сосновец; 4 – Кандалакша; Б – обеспеченность положительного отклонения ОУМ не менее 60 см от среднемесечного уровня в Северодвинске (1) и Соловках (2). Прямые на графиках показывают линейную регрессию межгодовых изменений рассматриваемых величин

Fig. 2. Statistical parameters of synoptic level fluctuations:

A – variance of RSL synoptic fluctuations from 2004 to 2020 in Severodvinsk (1), Solovki (2), Sosnovets (3) and Kandalaksha (4); B – probability of a positive RSL deviation at least 60 cm from the mean monthly level in Severodvinsk (1) and Solovki (2). Straight lines on the graphs show a linear regression of interannual changes in the values under consideration

Согласно данным, полученным на станциях Северодвинск и Соловки, наименьшие значения дисперсии наблюдались в 2004 и 2016 гг. Относительный минимум дисперсии по сравнению с соседними годами отмечен в 2018 г. Максимумы дисперсии наблюдались в 2005, 2011, 2017 и 2019 гг. Дисперсия в 2006–2010 гг. существенно не менялась, однако

после максимума 2011 г. произошел спад. В 2012–2014 гг. дисперсия была даже ниже, чем в 2005–2010 гг. В 2016 г. дисперсия опустилась примерно до уровня 2004 г. Начиная с 2017 г. наблюдается ее заметный рост, что свидетельствует об увеличении интенсивности колебаний ОУМ. Дисперсия в 2017–2020 гг., особенно на станции Северодвинск, суще-



ственно выше, чем в 2004–2010 гг. Возрастание дисперсии по сравнению с 2004–2010 гг. отмечается и на других станциях. Если сравнивать пятилетние периоды, то в Северодвинске средняя дисперсия в 2004–2008 гг. была равна 327,3, в 2009–2013 гг. – 341,4, а в 2016–2020 гг. – 386,8. В Соловках аналогичные величины следующие: 242,1, 258,1, 270,8. Эти результаты

указывают на то, что энергия колебаний ОУМ возрастает. К этому следует добавить, что количество нагонов, во время которых ОУМ повышался на 90 см и более, в 2004–2015 гг. равнялось шести, а за пять лет 2016–2020 г. – семи. Если рассматривать нагоны высотой не менее 100 см, то в 2004–2015 гг. их было два, а в 2016–2020 гг. – пять (табл. 2).

Таблица 2

## Характеристики нагонов

| № п/п | Дата       | ПДА / ТЦ | $R_M/H_M/H_0/T_{RM}$ |                      |                      | ТН |
|-------|------------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----|
|       |            |          | Сосновец (725)*      | Северодвинск (612)*  | Соловки (605)*       |    |
| 1     | 20.12.2007 | 975 / 1  | 63 / 180 / 660 / 01  | 92 / 128 / 635 / 11  | 60 / 91 / 594 / 14   | ИВ |
| 2     | 02.02.2009 | 985 / 1  | 91 / 231 / 685 / 15  | 111 / 155 / 617 / 20 | 87 / 109 / 588 / 23  | И  |
| 3     | 06.11.2010 | 970 / 1  | 62 / 272 / 748 / 12  | 96 / 161 / 655 / 08  | 70 / 112 / 612 / 14  | БЛ |
| 4     | 15.11.2011 | 970 / 1  | –                    | 153 / 188 / 701 / 13 | 112 / 140 / 653 / 16 | ИВ |
| 5     | 28.12.2011 | 970 / 1  | –                    | 97 / 164 / 649 / 09  | 64 / 110 / 612 / 22  | ИВ |
| 6     | 18.11.2013 | 970 / 4  | 60 / 218 / 709 / 02  | 94 / 152 / 655 / 02  | 47 / 97 / 605 / 08   | БЛ |
| 7     | 12.12.2013 | 960 / 1  | 90 / 205 / 691 / 13  | 86 / 120 / 625 / 19  | 90 / 111 / 620 / 21  | И  |
| 8     | 16.03.2016 | 970 / 1  | 80 / 215 / 679 / 02  | 105 / 166 / 648 / 10 | 85 / 112 / 598 / 12  | И  |
| 9     | 21.01.2017 | 970 / 1  | 77 / 191 / 651 / 11  | 107 / 142 / 623 / 15 | 81 / 106 / 607 / 17  | И  |
| 10    | 22.08.2018 | 985 / 6  | 99 / 182 / 644 / 13  | 130 / 163 / 638 / 10 | 85 / 109 / 604 / 18  | БЛ |
| 11    | 21.11.2018 | 980 / 2  | 71 / 206 / 685 / 16  | 105 / 144 / 630 / 00 | 81 / 113 / 613 / 02  | И  |
| 12    | 17.02.2019 | 985 / 4  | 67 / 212 / 687 / 19  | 94 / 153 / 626 / 22  | 82 / 117 / 613 / 24  | ИВ |
| 13    | 04.08.2019 | 980 / 7  | 46 / 263 / 729 / 06  | 98 / 169 / 645 / 12  | 67 / 119 / 614 / 18  | ИВ |
| 14    | 22.01.2020 | 970 / 1  | 69 / 222 / 722 / 09  | 100 / 151 / 644 / 18 | 68 / 101 / 614 / 16  | ИВ |

*Примечание.*  $R_M$  – максимальная высота ОУМ при нагоне относительно среднемесячного уровня  $M$ ;  $T_{RM}$  – время наступления  $R_M$  при нагоне;  $H_M$  – максимальная измеренная (суммарная) высота уровня относительно нуля поста; ПДА – приземное атмосферное давление в центре циклона; ТЦ – тип циклона; ТН – тип нагона: И – индуцированный нагон; ИВ – индуцированный нагон, существенно трансформированный воздействием ветра; БЛ – нагон, сформировавшийся в акватории Белого моря.

\* В скобках – критический уровень при нагонах.

Пусть  $Z_M$  – отклонение ОУМ от среднемесячного значения, положительное либо отрицательное. Тогда обеспеченность данного значения  $Z_M$  есть отношение количества случаев, для которых  $|Z| \geq |Z_M|$ , к общему числу анализируемых наблюдений, выраженный в процентах (%). Расчет выполнен для ежечасных рядов ОУМ продолжительностью один год. Результаты расчета обеспеченности превышения ОУМ не менее 60 см представлены на рис. 2Б. В целом обеспеченность положительных отклонений ОУМ тем больше, чем больше дисперсия. В течение рассматриваемого промежутка времени наблюдается тенденция к ее росту. Например, в 2011 г. на станции Северодвинск обеспеченность положительных отклонений ОУМ не менее 60 см была намного больше (0,95%), чем в 2004 г. (0,40%). Максимальная обеспеченность таких отклонений была в

2020 г. (1,23%). Такие же закономерности присущи колебаниям ОУМ на станциях Соловки и Сосновец. Так как использовались ежечасные ряды наблюдений, можно рассчитать, в течение какого времени тот или иной уровень был превышен в течение года. Например, в Северодвинске в 2019 г. обеспеченность превышения ОУМ не менее 60 см составляла 1,1%. Длина анализируемого годового ряда равна 8712 значений. Таким образом, ОУМ был выше 60 см в течение 96 часов суммарно в течение этого года. В 2004 г. эта величина была равна 35 часам при обеспеченности 0,4% и длине ряда 8736 значений. В 2018 г. обеспеченность высоты ОУМ не менее 60 см при длине ряда 8760 значений в Северодвинске составила 1,08% (95 часов), в Соловках – 0,85% (98,1 часа), в Сосновце – 0,29% (25 часов), в Кандалакше – 0,15% (13 часов).

**Типизация синоптических ситуаций**, при которых возникали нагоны в Белом море. Штормовые нагоны формируются в прибрежных районах при прохождении циклонов в результате падения ПДА и ветрового воздействия. Анализ полей ПДА позволил выделить семь типов синоптических ситуаций, при которых происходили нагоны в 2004–2020 гг. [Kondrin, Korablina, 2023].

**Первый тип.** Циклон Баренцева моря. Траектория проходит через Баренцево море с запада или северо-запада в юго-восточную, реже восточную его часть. К этому типу относятся как циклоны, проходящие через западную границу Баренцева моря, так и «ныряющие». Перед и во время нагонов центры циклонов этого типа располагаются в юго-восточной части Баренцева моря или над прилегающей к ней северной частью европейской территории России (ЕТР), или восточнее, над южной частью Карского моря и в районе п-ва Ямал.

Ко **второму типу** относятся арктические циклоны, траектория которых проходит вдоль 80° с. ш. – Гренландское море – арх. Шпицберген – северная граница Баренцева моря – арх. Земля Франца-Иосифа и далее на восток. Во время нагона эти циклоны в ряде случаев образуют малоподвижную обширную депрессию в приполярной области к северу от Баренцева или Карского морей, либо в их северной части.

В ситуации **третьего типа** траектория циклонов проходит через Скандинавский и Кольский п-ва с выходом в юго-восточную часть Баренцева моря и далее на восток. Центры циклонов при нагоне располагаются в юго-восточной части Баренцева моря вблизи Белого моря, в Печорском море и над Обской губой.

В ситуации **четвертого типа** траектория циклонов проходит из Северного моря через Скандинавский п-ов, Ботнический залив, Финляндию, далее на восток над акваторией Белого моря к Приполярному Уралу.

**Пятый тип** подобен типу 4, однако в этом случае траектории циклонов проходят южнее Белого моря.

К **шестому типу** относятся циклоны, возникающие в пределах ЕТР и в момент нагона находящиеся к востоку от Белого моря либо к северо-востоку (Карское море).

**Седьмой тип.** Белое море находится между областью высокого давления (1020–1030 гПа) на западе (Гренландия, Норвежское море, Скандинавский п-ов) и циклоном (990–1000 гПа) на востоке (ЕТР, Северный Урал, Западная Сибирь).

Согласно ранним исследованиям [Гидрометеорология..., 1991], циклоны, перемещающиеся в районе Белого и Баренцева морей, разделяются на «ныряющие», западные по Баренцеву, западные по Белому морям, южные и аномально смещающиеся.

Описанная здесь классификация атмосферных процессов при нагонах в основном согласуется с этой схемой (ситуации 1, 3–6), однако содержит две новые синоптические ситуации 2 и 7, которые ранее не рассматривались.

Согласно полученным результатам за рассматриваемый период времени (2004–2020) в Белом море имели место 98 случаев нагонов с максимальной высотой ОУМ относительно среднемесячного значения в Северодвинске 50 см и выше. При этом в ситуации 1 произошли 44 нагона, в ситуации 2 – шесть, в ситуации 3 – пять, в ситуации 4 – 15 нагонов и в ситуации 5 – три нагона. Таким образом, на долю западных циклонов (ситуации 1, 2, 3, 4 и 5) приходится 73 случая нагонов, т. е. 74,5%. Двадцать один нагон имел место при ситуации 6, остальные четыре – при ситуации 7.

**Характеристики нагонов.** При описании нагонов приняты следующие условные обозначения:  $M$  – среднемесячная высота уровня моря относительно нуля поста,  $R_M$  – максимальная высота ОУМ при нагоне относительно среднемесячного уровня  $M$ ;  $T_{RM}$  – время наступления максимума  $R_M$  при нагоне;  $H_M$  – максимальная измеренная (суммарная) высота уровня относительно  $M$ ;  $H_0$  – максимальная измеренная высота уровня относительно нуля поста, ПДА – приземное атмосферное давление (ПДА) в центре циклона. Отношение  $k = R_M/H_M$ , выраженное в процентах, характеризует относительный вклад повышения ОУМ в суммарное повышение уровня относительно среднемесячного значения. Кроме того, при описании нагонов учитывается, что в Белом море возраст прилива, т. е. запаздывание фазы прилива от соответствующего астрономического события (сизигия, квадратура), составляет примерно трое суток.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют случаи суммарного повышения уровня  $H_0$  выше критической отметки. Таких случаев в Северодвинске (критический уровень 612 см) в рассматриваемый период времени насчитывается 36, в Сосновце (критический уровень 725 см) – пять, в Соловках (критический уровень 605 см) – 16. Хотя достижение критического уровня зависит не только от высоты  $R_M$ , но также от среднемесячного уровня  $M$  и фазы прилива, все же в большинстве таких случаев (31 из 36) в Северодвинске  $k$  принимал значения от 50 до 81,4%. В Соловках в 15 случаях превышения критического уровня из 16  $k$  изменялся от 52 до 87,9% и лишь в одном случае был равен 48,4%. В Сосновце картина совсем другая. Здесь в пяти случаях превышения критического уровня  $k$  находился в пределах от 12,2 до 22,8%. Это объясняется тем, что в Горле вклад приливов в общую дисперсию колебаний уровня намного больше, чем

в других рассматриваемых пунктах, за исключением Кандалакши. Тем не менее в ряде случаев вклад повышения ОУМ здесь был достаточно велик. Например, 12.12.2013  $k = 42,9\%$  (см. табл. 2, № 7); 21.01.2017 – 40,3% (см. табл. 2, № 9); 22.08.2018 – 51,1% (см. табл. 2, № 10).

Отметим, что величины  $R_M$  и  $H_M$  рассчитаны относительно среднемесячных уровней, поэтому сезонные изменения уровня из этих данных исключены.

В табл. 2 помещены нагоны, при которых  $R_M \geq 90$  см и которые можно считать экстремальными. За 2004–2020 гг. таких нагонов произошло 14. В одиннадцати случаях нагоны относятся к типичным индуцированным (И-нагоны) и индуцированным с существенной ветровой составляющей (ИВ-нагоны), для которых характерно наступление максимума ОУМ сначала в Сосновце, затем в Северодвинске и позднее в Соловках. Промежутки времени между этими событиями могут быть различными в зависимости от степени ветрового воздействия в акватории Белого моря. Для типичного сценария И-нагона (см. табл. 2, № 2, 7, 8, 9, 11) временной промежуток между максимумом в Сосновце и Северодвинске составляет от 4 до 8 часов, в среднем около 6 часов, в Соловках максимум ОУМ достигается на 2–3 часа позже, чем

в Северодвинске. В случае сильного ветрового воздействия (ИВ-нагоны) промежутки времени между моментами наступления максимума ОУМ в рассматриваемых пунктах могут существенно изменяться (см. табл. 2, нагоны 1, 4, 5, 12, 13), а при нагоне 22 января 2020 г. в результате ветрового воздействия максимальное повышение ОУМ было достигнуто в Соловках на 2 часа раньше, чем в Северодвинске (см. табл. 2, № 14). Для типичного индуцированного нагона разница величин  $R_M$  в Соловках и Северодвинске менее значительна, чем в случае ИВ-нагонов. В Соловках  $R_M$  при И-нагонах составляет от 75,7 до 105% от этой величины в Северодвинске, в среднем 82,7%. В случае ИВ-нагонов указанное отношение обычно меньше и лежит в пределах 63,4–87,2%, в среднем – 70,2%.

Остальные три нагона (№ 3, 6, 10) были сформированы непосредственно в акватории Белого моря в результате преобладающего локального воздействия атмосферных факторов (БЛ-нагоны).

Наибольшие по высоте нагоны имели место 15 ноября 2011 г. [Магрицкий, Скрипник, 2016] и 22 августа 2018 г. [Kondrin, Korablina, 2023]. В Северодвинске в первом случае  $R_M = 153$  см (рис. 3Б), во втором  $R_M = 130$  см. Ниже приводятся описания некоторых типичных нагонов с различными сценариями развития.

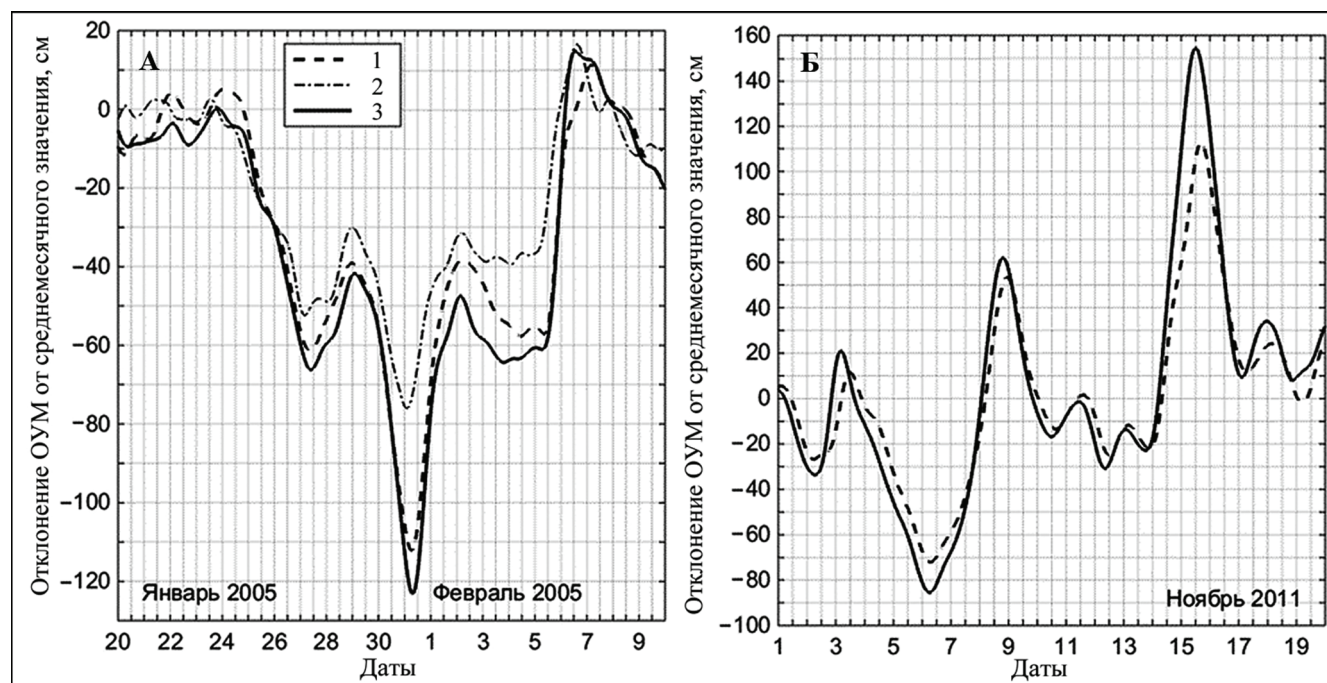


Рис. 3. Колебания ОУМ в январе–феврале 2005 г. (А) и в ноябре 2011 г. (Б):

1 – Соловки; 2 – Сосновец; 3 – Северодвинск

Fig. 3. The RSL fluctuations in January–February 2005 (A) and in November 2011 (B):

1 – Solovki; 2 – Sosnovets; 3 – Severodvinsk



Нагон 18 ноября 2013 г. (см. табл. 2, № 6) возник в результате действия очень быстрого (до 80 км/ч) глубокого (975 гПа) циклона четвертого типа, центр которого перед нагоном располагался над Двинским заливом, затем переместился к юго-востоку и создал сильный нагонный ветер северо-западных румбов [Кондрин, 2016]. В Северодвинске при значениях  $R_M = 94$  см и  $H_M = 152$  см  $k = 62\%$ . Суммарное возвышение уровня относительно нуля поста достигло очень большой величины ( $H_0 = 655$  см) при довольно высоком среднемесячном уровне  $M = 503$  см. В Соловках подъем ОУМ был существенно меньше ( $R_M = 47$  см), но суммарный подъем уровня относительно нуля поста все же достиг критической отметки  $H_0 = 605$  см при высоком среднемесячном уровне  $M = 508$  см. Максимум подъема ОУМ наблюдался в Северодвинске и Сосновце одновременно, примерно в 2 часа 18 ноября, а через 6 часов в Соловках. Таким образом, имел место преимущественно ветровой нагон в Двинском заливе и северо-восточной части моря, затем достигший Соловецких о-вов (БЛ-нагон). Прилив почти сизигийный: 1-я четверть – 10 ноября, полнолуние – 17 ноября.

Нагон 12 декабря 2013 г. (см. табл. 2, № 7) представляет собой типичный пример индуцированного нагона (И-нагон). В Сосновце ОУМ достиг максимума 90 см в 13:00 12 декабря ( $k = 44\%$ ), в Северодвинске максимальное повышение ОУМ до 86 см ( $k = 72\%$ ) произошло через 6 часов в 19:00, в Соловках ОУМ повысился до 90 см в 21:00 ( $k = 81\%$ ). Нагон вызван глубоким циклоном первого типа, центр которого (960 гПа) 12 декабря в 12:00 находился в Печорском море. Ветер западный 10 м/с в Белом море, до 30 м/с в Баренцевом. Отметим, что этот нагон представляет один из редких случаев, при которых ОУМ в Сосновце и Соловках поднимался выше, чем в Северодвинске.

Нагон 21 ноября 2018 г. (см. табл. 2, № 11) возник в результате воздействия обширного циклона второго типа в субполярной области к северу от Баренцева и Карского морей. 20 ноября 2018 г. перед нагоном в 18:00 сформировался вторичный центр (980 гПа) в южной части Карского моря. В Баренцевом море преобладал северный ветер 15–20 м/с. Максимальное повышение ОУМ произошло: в Сосновце в 16:00 20 ноября до 70 см ( $k = 34\%$ ), в Северодвинске в 00:00 21 ноября до 105 см ( $k = 73\%$ ), в Соловках в 02:00 21 ноября до 80 см ( $k = 72\%$ ). В Кандалакше максимальный подъем ОУМ до 56 см произошел в 01:00 21 ноября. Типичный И-нагон.

Нагон 04 августа 2019 г. сформировался при синоптической ситуации седьмого типа (см. табл. 2 № 13). Во время нагона центр циклона (980 гПа) 4 августа в 06:00 располагался к юго-востоку от Чешской губы, а область повышенного давления –

над Гренландией (1030 гПа). В юго-восточной части Баренцева моря длительное время дул северо-восточный ветер 18–20 м/с, в Белом море преобладал северный ветер такой же силы. В результате в Сосновце ОУМ поднялся до 46 см ( $k = 17\%$ ) в 06:00 4 августа, затем в Северодвинске – до 98 см ( $k = 58\%$ ) в 12:00, затем в Соловках – до 67 см ( $k = 56\%$ ) в 18:00. Этот нагон можно отнести к индуцированным с преобладающей ролью ветрового фактора (ИВ-нагон). Во всех рассматриваемых пунктах  $H_0$  был выше критических значений.

**Сгоны.** В Белом море помимо нагонов нередко происходят падения ОУМ, вызываемые метеорологическими причинами.

В целом обеспеченность отрицательных отклонений ОУМ от среднемесячных значений существенно меньше, чем положительных (рис. 4). Это говорит о том, что значительные сгоны происходят реже и по своей абсолютной величине, как правило, уступают нагонам. Однако, исключение представляет собой 2005 г., в котором произошел самый значительный сгон за рассматриваемый период времени 2004–2020 гг. (см. рис. 3А).

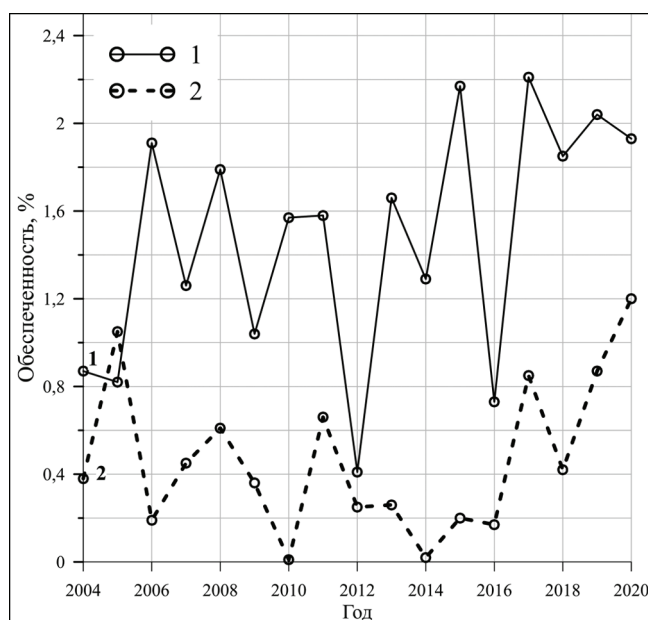


Рис. 4. Обеспеченность повышений (1) и понижений (2) ОУМ  $\geq 50$  см в Северодвинске в 2004–2020 гг.

Fig. 4. Probability of RSL increases (1) and decreases (2)  $\geq 50$  cm in Severodvinsk in 2004–2020

Ниже описаны два самых больших сгона, когда ОУМ в Северодвинске понизился на 85 см (6 ноября 2011 г.) и 123 см (31 января 2005 г.).

Сгон 31 января 2005 г. (см. рис. 3А) образовался в результате действия очень сильного (25–30 м/с) сгонного юго-западного ветра над Белым морем на периферии интенсивного глубокого (965 гПа) ци-

клона, центр которого перед сгоном и во время него находился в северной части Скандинавского п-ва, в районе м. Нордкап. Этот циклон в течение 1,5 суток оставался на одном месте, так как с востока блокировался мощным антициклоном на севере Западной Сибири с давлением в центре 1055 гПа. В Северодвинске ОУМ понизился на 123 см ниже среднемесячной отметки, в Соловках на 112 см, в Сосновце на 68 см. Этот сгон был сильнейшим за весь период 2004–2020 гг.

Сгон 6 ноября 2011 г. (см. рис. 3Б) образовался в результате действия мощного антициклона, который сформировался 5 ноября с центром (1040–1045 гПа) в районе Двинского залива. Затем центр этого антициклона сместился к юго-востоку. Таким образом, акватория Белого моря находилась в тыловой части этого антициклона и длительное время подвергалась действию сгонного юго-западного ветра порядка 15 м/с. Понижение ОУМ в Северодвинске и Соловках составило –85 см и –70 см соответственно. В других случаях при значительных сгонах понижение ОУМ было не более 70 см.

### ВЫВОДЫ

Согласно данным, полученным на станциях Северодвинск и Соловки, за рассматриваемый промежуток времени наблюдается заметный рост дисперсии синоптических колебаний ОУМ. Если сравнивать пятилетние периоды, то в Северодвинске средняя дисперсия в 2004–2008 гг. была равна 327,3, в 2009–2013 гг. – 341,4, а в 2016–2020 гг. – 386,8 см<sup>2</sup>. В Соловках эти величины следующие: 242,1, 258,1, 270,8 см<sup>2</sup>.

Обеспеченность положительных отклонений ОУМ тем больше, чем больше дисперсия и, соответственно, наблюдается тенденция ее роста в течение

рассматриваемого промежутка времени. Представленные линейные тренды как дисперсии, так и обеспеченности, рассчитаны на 95% доверительном уровне. В этой связи также следует отметить, что за 12 лет (2004–2015) имели место всего два нагона с  $R_M$  не менее 100 см, а в пятилетний промежуток (2016–2020) таких нагонов произошло уже пять.

Наибольшей дисперсией характеризуются колебания ОУМ в Двинском заливе. На Соловках и в Сосновце колебания ОУМ обладают примерно одинаковой дисперсией, которая существенно ниже, чем в Двинском заливе. Самая низкая дисперсия наблюдается в Кандалаксе.

За рассматриваемый период времени (2004–2020) в Белом море имели место 98 случаев нагонов с максимальной высотой ОУМ относительно среднемесячного значения ( $R_M$ ) в Северодвинске 50 см и выше. Описаны семь типов синоптических ситуаций, при которых в Белом море возникали нагоны. Наиболее часто нагоны возникают при прохождении западных циклонов, на долю которых приходится 73 случая из 98, т. е. 74,5%. Наибольшие по высоте нагоны имели место 15 ноября 2011 г. и 22 августа 2018 г. В Северодвинске в первом случае  $R_M = 153$  см, во втором  $R_M = 130$  см.

Значительные сгоны происходят реже, чем нагоны, и по своей абсолютной величине, как правило, уступают последним. В целом обеспеченность отрицательных отклонений ОУМ от среднемесячных значений существенно меньше, чем положительных. Сгон 31 января 2005 г. был сильнейшим за весь период 2004–2020 гг. В Северодвинске ОУМ понизился на 123 см ниже среднемесячной отметки, в Соловках на 112 см. В других случаях понижения ОУМ относительно среднемесячного значения при значительных сгонах были порядка 70 см.

**Благодарность.** Работа выполнена на кафедре океанологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в соответствии с госзаданием № 12103190090-06 «Комплексные исследования современного состояния вод Мирового океана».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. II. Белое море. Вып. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 240 с.
- Инжебейкин Ю.И. Колебания уровня Белого моря. Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2003. 152 с.
- Кислов А.В. Климатология с основами метеорологии: учебник для учреждений высш. образования. М.: Академия, 2016. 224 с.
- Кондрин А.Т. Формирование штормовых нагонов в Белом море // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 6. С. 33–40.
- Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А. Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // Геоиск. 2015. № 1. С. 18–25.
- Магрицкий Д.В., Скрипник Е.Н. Опасные гидрологические процессы в устье Северной Двины и факторы их многолетней изменчивости // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 6. С. 59–70.
- Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 247 с.
- Морозова С.В., Алимпиева М.А., Короткова Н.В., Абаников В.Н. Взаимодействие объектов циркуляции и их климатическая динамика на примере центров действия атмосферы Северного полушария // Вестн. Удмуртского ун-та. Сер. Биол. науки о Земле. 2022. Т. 32. Вып. 2. С. 166–174.
- Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю., Виноградова В.В. Арктический фронт и ледовитость Баренцева моря в зим-

- ний период // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 117–125.
- Emery W.J., Thompson R.E. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, Amsterdam, Elsevier, 2001, 638 p.
- Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen Ola M. et al. *White Sea. Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change*, Springer – Verlag, Berlin, Praxis Publ., Chichester, UK, 2005, 462 p.
- Foreman M.G.G. Manual for tidal heights analysis and prediction, *Pacific Marine Sci. Rep.* 77–10, Sidney, 1977, 62 p. (Reprinted 1984).
- Kondrin A.T., Korablina A.D. Synoptic Level Fluctuations of the White Sea, *Russian journal of Earth sciences*, 2023, vol. 23(1), p. 1–12, DOI: 10.2205/2023ES000836.
- Korablina A.D., Kondrin A.T., Arkhipkin V.S. Numerical simulations and statistics of surges in the White and Barents seas, *Russian journal of Earth sciences*, 2017, vol. 17, p. 1–11, ES4004, DOI: 10.2205/2017ES000608.
- Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE, *Computers and Geoscience*, 2002, vol. 28, p. 929–937.
- Электронные ресурсы  
Реанализ CFSR, URL: <https://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php?model=cfsr> (дата обращения 22.02.2023).

Поступила в редакцию 20.04.2023

После доработки 16.06.2023

Принята к публикации 27.07.2023

## WHITE SEA SURGE LEVEL FLUCTUATIONS ACCORDING TO OBSERVATION DATA 2004–2020

A.T. Kondrin<sup>1</sup>, A.D. Korablina<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology

<sup>1</sup> Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: [alt.kondrin@yandex.ru](mailto:alt.kondrin@yandex.ru)

<sup>2</sup> Independent Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: [jacksparrow91@bk.ru](mailto:jacksparrow91@bk.ru)

Fluctuations of the residual level of the White Sea in the synoptic range of time scales, including surge fluctuations, are considered on the basis of observation data covering 2004–2020 period. Hourly data on the level at coastal points of Sosnovets, Severodvinsk, Solovki and Kandalaksha were analyzed. The surge run-ups and run-offs are studied based on the analysis of residual sea level (RSL) fluctuations, which is calculated by removing the tidal component from the observation data. The Dvina Bay RSL fluctuations are characterized by the greatest variance. The RSL fluctuations at Sosnovets and Solovki have approximately the same variance, which is significantly lower than in Dvina Bay. The lowest variance is observed in Kandalaksha. According to the data obtained at the Severodvinsk and Solovki stations, a noticeable increase in the variance of RSL fluctuations is observed over the considered period of time, which indicates an increase in their intensity. If five-year periods are compared, the average dispersion in Severodvinsk is 327,3 cm<sup>2</sup> in 2004–2008, 341,4 cm<sup>2</sup> in 2009–2013, and 386,8 cm<sup>2</sup> in 2016–2020. This conclusion is confirmed by the calculations of the probability of positive RSL deviations, as well as by the fact that the number of surge run-ups with a height no less than 100 cm was only two during 12 years from 2004 to 2015, and there were already five such surges in the five-year period 2016–2020. Seven types of synoptic situations are described in which surge run-ups occurred in the White Sea, two of which were not previously considered. Western cyclones of various trajectories account for 73 (74,5%) out of 98 cases of surge run-ups considered in the paper. The largest surge run-ups in Severodvinsk during the period under review reached a height of 130 cm (August 22, 2018) and 153 cm (November 15, 2011). Significant surge run-offs are less frequent than surge run-ups, being, as a rule, lower in their absolute value. The surge run-off on January 31, 2005 was the most pronounced for the entire period 2004–2020. The RSL in Severodvinsk dropped by 123 cm below the monthly average, and by 112 cm in Solovki.

**Keywords:** tides, residual sea level, storm surge, variance, probability, synoptic situations, inter-annual variability

**Acknowledgement.** The work was carried out at the Oceanology Department, MSU Faculty of Geography, in accordance with the state assignment no. 12103190090-06 “Complex study of the current state of waters of the World Ocean”.

## REFERENCES

- Emery W.J., Thompson R.E. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, Amsterdam, Elsevier, 2001, 638 p.
- Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen Ola M. et al. *White Sea. Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change*, Springer – Verlag, Berlin, Praxis Publishing, Chichester, UK, 2005, 462 p.



- Foreman M.G.G. Manual for tidal heights analysis and prediction. Sidney, *Pacific Marine Sci. Rep.* 77–10, 1977, 62 p. (Reprinted 1984).
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR, tom II, Beloe more [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR, vol. 2, White Sea], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, vyp. 1, 240 p. (In Russian)
- Inzhebeikin Yu.I. Kolebaniya urovnya Belogo moray [The White Sea level fluctuations], Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2003, 152 p. (In Russian)
- Kislov A.V. Klimatologiya s osnovami meteorologii: uchebnyk dlya stud. uchrezhdenii vyssh. obrazovaniya [Climatology with basics of meteorology: a textbook for the students of institutions of higher education], Moscow, Akademiya Publ., 2016, 224 p. (In Russian)
- Kondrin A.T., Korablina A.D. Synoptic Level Fluctuations of the White Sea, *Russian journal of Earth sciences*, 2023, vol. 23(1), p. 1–12, DOI: 10.2205/2023ES000836.
- Kondrin A.T. Formirovanie shtormovykh nagonov v Belom more [Formation of storm surges in the White Sea], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 6, p. 33–40. (In Russian)
- Korablina A.D., Kondrin A.T., Arkhipkin V.S. Numerical simulations and statistics of surges in the White and Barents seas, *Russian journal of Earth sciences*, 2017, vol. 17, p. 1–11, ES4004, DOI:10.2205/2017ES000608.
- Lebedeva S.V., Alabyan A.M., Krylenko I.N., Fedorova T.A. Navodneniya v ust'e Severnoi Dviny i ikh modelirovanie [Floods at the Northern Dvina mouth and their modeling], *Georisk.*, 2015, no. 1, p. 18–25. (In Russian)
- Magritskii D.V., Skripnik E.N. Opasnye gidrologicheskie protsessy v ust'e severnoi Dviny i faktory ikh mnogoletnei izmenchivosti [Hydrological hazards in the mouth of the Northern Dvina River and the causes of their long-term variations], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 6, p. 59–70.
- Monin A.S. Vvedenie v teoriyu klimata [Introduction to the theory of climate], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 247 p. (In Russian)
- Morozova S.V., Alimpieva M.A., Korotkova N.V., Abanikov V.N. Vzaimodeistvie ob'ektov tsirkulyatsii i ikh klimaticheskaya dinamika na primere tsentrov deistviya atmosfery severnogo polushariya [Interaction of circulation objects and their climatic dynamics on the example of the atmosphere action centers of the northern hemisphere], *Vestn. Udmurtskogo un-ta, Ser. Biol. nauki o Zemle*, 2022, vol. 32, rel. 2, p. 166–174. (In Russian)
- Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE, *Computers and Geoscience*, 2002, vol. 28, p. 929–937.
- Titkova T.B., Mikhailov A.Yu., Vinogradova V.V. Arkticheskii front i ledovitost' Barentseva morya v zimnii period [Arctic front and ice coverage of the Barents Sea in winter], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 3, p. 117–125. (In Russian)
- Web source*  
Data of Climate Forecast System Reanalysis, URL: <https://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php?model=cfsr> (access date 22.02.2023).

Received 20.04.2023

Revised 16.06.2023

Accepted 27.07.2023

УДК 551.79

## ИНГРЕССИЯ КАРАНГАТСКОГО МОРЯ В МАНЫЧСКУЮ ДЕПРЕССИЮ (ПОЗДНИЙ ПЛЕЙСТОЦЕН)

Д.В. Семиколенных<sup>1</sup>, Р.Н. Курбанов<sup>2</sup>, Т.А. Янина<sup>3</sup>

<sup>1–3</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена*

<sup>2</sup> *Институт географии РАН, отдел палеогеографии четвертичного периода*

<sup>1</sup> *Инженер, канд. геогр. наук; e-mail: aristova@igras.ru*

<sup>2</sup> *Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: roger.kurbanov@gmail.com*

<sup>3</sup> *Зав. лабораторией, д-р геогр. наук; e-mail: paleo@inbox.ru*

В работе представлены результаты палеогеографического изучения (фациально-литологический, малакофаунистический, люминесцентный анализы) кернa трех скважин, пробуренных в центральной части Манычской депрессии, позволившие определить время и этапы существования ингрессионного залива карангатского бассейна в Манычской депрессии, провести корреляцию с выделенными ранее на основе люминесцентного датирования фазами карангатской трансгрессии Азово-Черноморского бассейна. По итогам исследования установлено: 1) ингрессия морского карангатского бассейна Понта проникала в пределы Манычской депрессии во вторую фазу трансгрессии во временном интервале ~120–110 тыс. лет назад (МИС 5e–d). Соленость залива в районе современного озера Маныч-Гудило достигала 20–22‰; 2) приток вод гирканской трансгрессии Каспия в залив в центральной части Манычской депрессии имел место 110–105 тыс. лет назад, что соответствует третьей фазе карангатской трансгрессии (МИС 5c). Солоноватые каспийские воды опреснили карангатский залив в районе современного оз. Маныч-Гудило до 14‰ и ниже; 3) воды карангатского бассейна окончательно покинули пределы Манычской депрессии около 105 тыс. лет назад (МИС 5c).

**Ключевые слова:** биостратиграфия, геохронология, ОСЛ-датирование, малакофауна, Каспийское море, Черное море

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.9

### ВВЕДЕНИЕ

В начале позднего плейстоцена (МИС 5) в пределах современного Азово-Черноморского бассейна развивалась карангатская трансгрессия, вызванная межледниковым поднятием уровня Мирового океана. Карангатский бассейн, превышавший на 6–7 м современный уровень моря, был самым тепловодным в позднеледниковой истории Понта, с соленостью воды значительно (на 8–10‰) выше нынешней солености Черного моря [Федоров, 1963; Невеская, 1965; Геология шельфа..., 1981; Янко и др., 1990; Свиточ, 2009; Янина, 2012; Семиколенных и др., 2023].

Отложения карангатской трансгрессии встречаются в естественных береговых обнажениях Болгарии, Восточного Крыма, Тамани, Кавказа, Турции, скважинами вскрыты на шельфах Черного и Азовского морей, в устьевых областях крупных рек, в западной части Колхидской низменности, в акватории Керченского пролива и в

Манычской депрессии. Анализ бурового материала (около двадцати скважин) позволил Г.И. Попову [1955, 1983] проследить карангатские отложения по долине Западного Маныча вплоть до поднятия у поселка Зунда Толга (Республика Калмыкия), которое на протяжении всего позднего плейстоцена являлось водоразделом между Понтом и Каспием [Попов, 1983]. Им сделано заключение о существовании ингрессионного залива карангатского моря, глубоко проникавшего в Манычскую депрессию. Отмечено [Горецкий, 1955; Попов, 1983; Янина, 2012], что даже близ балки Хара-Зуха (Республика Калмыкия) в составе карангатского малакофаунистического комплекса наблюдались средиземноморские виды, обитающие при солености около 20‰.

До недавнего времени ввиду отсутствия геохронологических данных для отложений карангатской трансгрессии как в Азово-Черноморском бассейне, так и в Манычской депрессии, не пред-

ставлялось возможным определить временной интервал проникновения карангатских вод в пределы депрессии и сопоставить его с фазами трансгрессии.

В работе представлены новые геохронологические данные, позволившие определить время существования ингрессионного залива карангатского бассейна в центральной части Манычской депрессии и провести корреляцию с выделенными нами ранее на основе люминесцентного датирования фазами карангатской трансгрессии Азово-Черноморского бассейна [Курбанов и др., 2019, 2020].

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования в данной работе являются горизонты отложений, содержащие морские (черноморские) виды в составе малакофаунистических комплексов, вскрытые тремя скважинами в центральной части Манычской депрессии (рис. 1): скважина PR-1 (N 46°36'26,5 E 41°51'43,7) пробурена на правом берегу р. Западный Маныч в 7 км к ЮВ от г. Пролетарск, Ростовская область; скважина MN-1 (N 46°26'52,7 E 42°41'19,6) пробурена близ оз. Грузское в 5 км к ССЗ от пос. Маныч, Ростовская область; скважина OL-1 (N 46°00'23,4

E 43°28'20,7) была пробурена на северном берегу о. Левый в 4 км к востоку от трассы Р-216, оз. Маныч, Республика Калмыкия.

Бурение осуществлялось машинной буровой установкой ударно-канатным способом с выходом керна диаметром 15 см. Выполнено фацально-литологическое описание керна, проведены малакофаунистический и геохронологический анализы.

Изучение включений фауны моллюсков выполнено в НИ лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова с целью биостратиграфического обоснования геологического возраста осадков и реконструкции палеоэкологических условий их накопления.

Абсолютная хронология получена методом оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ). Датирование отложений, вскрытых скважинами, выполнено в Скандинавской лаборатории люминесцентного датирования Орхусского университета (Дания). Предварительная подготовка проб проводилась в НИ лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова по принятому в Орхусском университете протоколу [Курбанов и др., 2018].

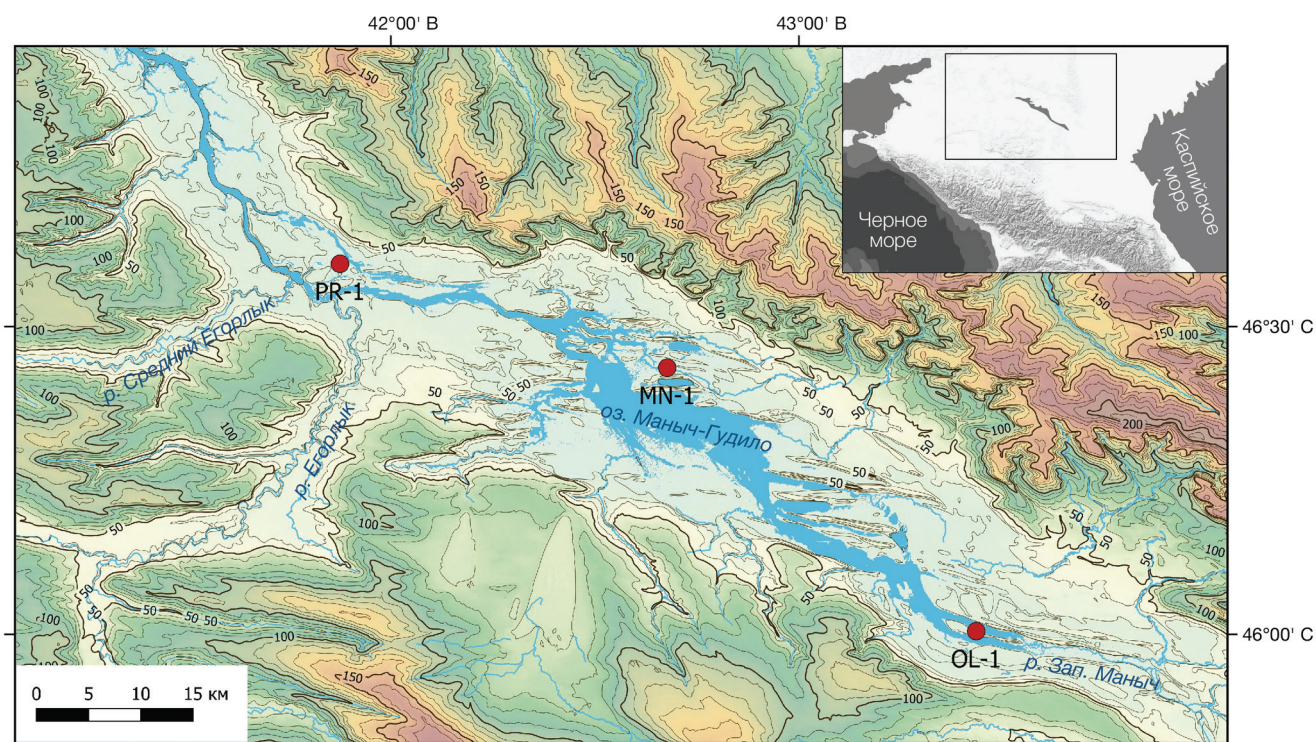


Рис. 1. Местоположение точек бурения скважин в Манычской депрессии

Fig. 1. Location of drilling points in the Manych Depression



## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В керне скважины PR-1 сверху вниз вскрываются (рис. 2): 1 – антропогенно преобразованный слой и современная каштановая почва с включением корней растений мощностью 0,5 м, переход к нижележащему слою постепенный; 2 – светло-коричневый суглинок на глубине 0,5–10,5 м с включением карбонатов, граница с нижележащим слоем четкая; 3 – серая глина в интервале керна 10,5–14,2 м с прослоями супеси / алевролита и единичным включением гипса, пятен ожелезнения и марганцевания, с глубины 11,8 м встречается раковинный детрит, граница с нижележащим слоем четкая; 4 – серо-бежевый суглинок с неясной слоистостью на глубине 14,2–16,5 м, граница с нижележащим слоем четкая; 5 – темно-серый до синего комковатый тяжелый суглинок в интервале 16,5–18,6 м с включением марганцевых пятен и гипса, граница с нижележащим слоем четкая; 6 – серый суглинок в интервале 18,6–26,7 м с редкими включениями прослоев песка, алевролита, раковинного детрита и целых раковин пресноводных моллюсков, в подошве наблюдаются следы ожелезнения, включения мелкого гравия и раковинного детрита, граница с нижележащим слоем четкая; 7 – серо-бежевый суглинок на глубине 26,7–31,8 м, с редкими тонкими прослоями алевролита, редким включением гипса в кровле и обильным включением детрита, целых раковин каспийской фауны моллюсков с глубины 27,5 м, переход к нижележащему слою постепенный; 8 – темно-серая глина на глубине 31,8–33,5 м, с редким включением раковинного детрита, с глубины 32,5 м встречаются целые раковины каспийских и черноморских видов моллюсков (31,8–32,2; 32,7–33,5 м – пропуск в керне), переход к нижележащему слою резкий; 9 – опесчаненная серая супесь в интервале 33,5–36,2 м, с включением раковин морских черноморских моллюсков, переход к нижележащему слою резкий; 10 – серый легкий суглинок до супеси на глубине 36,2–38,0 м, с неясной слоистостью и редким включением детрита и мелких обломков раковин моллюсков, с глубины 37,0 м наблюдаются пятна ожелезнения и омарганцевания, мелкие карбонатные включения, граница с нижележащим слоем четкая; 11 – светло-коричнево-бежевая супесь до песка в интервале 38,0–40,0 м, с включением раковинного детрита (39,0–40,0 м – пропуск в керне), с глубины 38,5 м обводненная супесь темно-бежевого цвета, граница с нижележащим слоем четкая;

12 – темно-серый тяжелый суглинок с редкими включениями мелких кристаллов гипса, на видимую мощность до 0,2 м.

В керне скважины MN-1 сверху вниз вскрываются (см. рис. 2): 1 – современная каштановая почва мощностью 1,2 м с антропогенной покрывкой в кровле, переход к нижележащей толще постепенный; 2 – светло-коричневые суглинки в интервале 1,2–15,0 м, от легких в кровле до тяжелых в подошве, с включениями гипса и прослоев алевролита, количество которых увеличивается вниз по керну, граница с нижележащим слоем четкая; 3 – сизовато-темно-серая глина на глубине 15,0–18,0 м с включением редких кристаллов гипса, прослоев с раковинами моллюсков, марганцевых пятен и пятен ожелезнения, в кровле наблюдается скопление раковинного детрита, с глубины 17,5 м встречаются прослой алевролита, переход к нижележащей толще постепенный; 4 – темно-серая плотная глина на глубине 18,0–20,4 м с включением карбонатов и пятен ожелезнения, переход к нижележащей толще постепенный; 5 – сизовато-серый от легкого до среднего алевролитистый суглинок на глубине 20,4–27,6 м с включением пятен ожелезнения и марганцевания, встречаются прослой алевролита, в интервале 25,8–26,0 м наблюдается прослой более темного серого цвета, обогащенный детритом, мелкими обломками тонкостворчатых раковин моллюсков, в подошве слоя отмечается опесчаненный прослой с включением раковин моллюсков, граница с нижележащим слоем четкая; 6 – серо-коричневый тяжелый суглинок в интервале 27,6–29,2 м с включением многочисленных раковин каспийских видов моллюсков, граница с нижележащим слоем четкая; 7 – серый легкий суглинок на глубине 29,2–31,8 м с включением многочисленных раковин черноморских и каспийских видов моллюсков, граница с нижележащим слоем четкая; 8 – сизовато-серый тяжелый суглинок-глина на глубине 31,8–36,8 м, с включением алевролита, пятен марганцевания, встречаются обильные включения раковин черноморских видов моллюсков, в подошве наблюдается повышенная концентрация пятен ожелезнения, граница с нижележащим слоем четкая; 9 – толща переслаивающихся светло-коричневого суглинка и опесчаненной супеси на глубине 36,8–40,0 м, с включением раковинного детрита, пятен марганцевания и ожелезнения, граница с нижележащим слоем четкая; 10 – темно-серый до сизого тяжелый суглинок в интервале 40,0–42,0 м, с прослоями алевролита и включением раковинного детрита.

Fig. 2. Lithology, biostratigraphy and geochronology of deposits

в интервале 0,1–1,5 м с включением карбонатов (1,1–1,5 м – пропуск в керне), переход в нижележащий слой постепенный; 3 – темно-коричневая глина в интервале керна 1,5–4,8 м, с включением

карбонатов, пятен ожелезнения и марганцевания (1,8–1,9 м – пропуск в керне), переход в нижележащий слой постепенный; 4 – светло-серио-коричневая глина на глубине 4,8–11,0 м, в интервале 7,7–8,0 м наблюдается прослой песка, глубже, до 8,5 м, появляются прослой алевроита и мелкозернистого песка (5,8–6,2 м – пропуск в керне), переход в нижележащий слой постепенный; 5 – сизовато-серая плотная глина в интервале керна 11,0–13,2 м, переход в нижележащий слой постепенный; 6 – темно-коричневая плотная глина в интервале керна 13,2–15,6 м, на глубине 15,4–15,6 м наблюдается прослой серого мелкозернистого песка, переход в нижележащий слой постепенный; 7 – темно-коричневый суглинок

в интервале керна 15,6–20,4 м с включением мелких раковин моллюсков и раковинного детрита, с глубины 18,8 м с включением раковинного детрита (19,6–20,0; 18,4–18,8 м – пропуск в керне), граница с нижележащим слоем четкая; 8 – желтый средне-мелкозернистый, хорошо сортированный песок в интервале 20,4–22,0 м с обильным включением раковинного детрита.

**Малакофаунистический анализ.** Результат малакофаунистического анализа керна скважин PR-1, MN-1 и OL-1 представлен на рисунках 2 и 3. Перечень видов, составляющих малакофаунистические комплексы керна скважин, и их экологические предпочтения представлены в таблице 1.



Рис. 3. Некоторые виды морских моллюсков, обнаруженные в скважинах центрального Маныча:  
1 – *Ostrea edulis*; 2 – *Paphia senescens*; 3 – *Cerastoderma glaucum*; 4 – *Flexopecten glaber*

Fig. 3. Some species of marine mollusks found in the boreholes of the central Manych:  
1 – *Ostrea edulis*; 2 – *Paphia senescens*; 3 – *Cerastoderma glaucum*; 4 – *Flexopecten glaber*

Малакофаунистические комплексы, включающие морские (черноморские) виды, выделены в составе отложений, вскрытых скважинами PR-1 и MN-1 на глубинах 32,5–36,2 и 29,2–36,8 м соответственно. Комплекс, состоящий только из черноморских видов (*Paphia senescens*, *Flexopecten glaber*, *Chamelea gallina* и др.), был обнаружен на глубине 33,5–36,2 м в скважине PR-1 и на глубине 31,8–36,8 м в скважине MN-1, он отражает существование в пределах центральной части Манычской депрессии достаточно тепловодного залива карангатского бассейна с соленостью вод, сопоставимой с соленостью современного Черного моря (около 18‰). Сменивший его выше по керну лиманно-морской комплекс, в составе которого обнаружены как морские эвригалинные виды (*Cerastoderma glaucum*, *Mytilaster lineatus*), так и солоновато-

водные каспийские (*Monodacna caspia*, *Didacna cristata*), маркирует начало поступления вод гирканской трансгрессии и их смешения с водами карангатского бассейна [Курбанов и др., 2018]. Судя по видовому составу комплекса, размеру и сохранности раковин, водоем характеризовался спокойной динамической обстановкой с соленостью не выше 14‰. Выше в скважинах PR-1 и MN-1 были вскрыты третий (гирканский) и четвертый (буртасский) комплексы [Курбанов и др., 2018], в составе которых доминируют каспийские моллюски, а морские виды уже отсутствуют.

В керне скважины OL-1 на глубине 20,0 м в керне был обнаружен малакофаунистический комплекс, в составе которого выделена фауна гирканского бассейна (*Didacna cristata*, *D. hyrcana* и др.), а также обломки раковин черноморского моллюска



*Cerastoderma glaucum*, что указывает на влияние вод карангатского бассейна. По-видимому, скважина пробурена в самой восточной части карангатского залива, где соленость, судя по видовому составу и угнетенному виду раковин, едва ли превышала 5‰.

**Геохронологический анализ.** Для определения возраста отложений, вскрытых в скважине MN-1, методом ОСЛ-датирования было отобрано шесть образцов. В процессе геохронологического исследования использовано три протокола датирования [Курбанов и др., 2020]: по кварцу (ОСЛ) и по полевому шпату при разных температурах преднагрева (ИКСЛ<sub>50</sub> и ИКСЛ<sub>290</sub>). Все образцы прошли

необходимые тесты, принятые в ОСЛ-датировании для подтверждения надежности и достоверности конечных геохронологических данных, результаты которых оказались в рамках принятых стандартов, что указывает на высокую надежность полученной хронологии.

Первые четыре образца показали наличие быстрого компонента в навесках кварца (ОСЛ), однако все последующие оказались близки к сатурации, т. е. к пределу датирования. В связи с этим абсолютный возраст был получен по полевым шпатам с помощью протокола ИКСЛ<sub>290</sub> [Buylaert et al., 2012]. Результаты датирования представлены в таблице 2.

Таблица 1

**Виды моллюсков, обнаруженные при изучении керна скважин PR-1, MN-1 и OL-1**

| № п/п | Вид                                      | Семейство    | Отложения                                | Бассейн      | Соленость, ‰ |
|-------|------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|--------------|--------------|
| 1     | <i>Cerastoderma glaucum</i> <sup>4</sup> | Cardiidae    | Верхнечетвертичные Понта                 | Понт         | ≥2,5         |
| 2     | <i>Chamelea gallina</i> <sup>1</sup>     | Veneridae    | Верхнечетвертичные Понта                 | Понт         | ≥14          |
| 3     | <i>Didacna cristata</i> <sup>2</sup>     | Cardiidae    | Гирканские                               | Каспий       | 3–14         |
| 4     | <i>Didacna hyrcana</i> <sup>3</sup>      | Cardiidae    | Гирканские                               | Каспий       | —            |
| 5     | <i>Didacna subcatillus</i> <sup>5</sup>  | Cardiidae    | Гирканские, нижнехвалынские              | Каспий       | —            |
| 6     | <i>Dreissena caspia</i> <sup>4</sup>     | Dreissenidae | Вехнечетвертичные отложения Понто-Каспия | Каспий       | 2–13         |
| 7     | <i>Dreissena grimmi</i> <sup>4</sup>     | Dreissenidae | Вехнечетвертичные отложения Понто-Каспия | Каспий       | 7–12         |
| 8     | <i>Dreissena polymorpha</i> <sup>1</sup> | Dreissenidae | Вехнечетвертичные отложения Понто-Каспия | Понто-Каспий | ≤13          |
| 9     | <i>Flexopecten glaber</i> <sup>1</sup>   | Pectinidae   | Карангатские, новочерноморские           | Понт         | ≥17          |
| 10    | <i>Loripes orbiculatus</i> <sup>1</sup>  | Lucinidae    | Карангатские, новочерноморские           | Понт         | 10–30        |
| 11    | <i>Monodacna caspia</i> <sup>1</sup>     | Cardiidae    | Вехнечетвертичные отложения Понто-Каспия | Каспий       | 2–14         |
| 12    | <i>Mytilaster lineatus</i> <sup>1</sup>  | Mytilidae    | Вехнечетвертичные отложения Понта        | Понт         | ≥5           |
| 13    | <i>Ostrea edulis</i> <sup>1</sup>        | Ostreidae    | Вехнечетвертичные отложения Понта        | Понт         | ≥13–14       |
| 14    | <i>Parvicardium exiguum</i> <sup>1</sup> | Cardiidae    | Вехнечетвертичные отложения Понта        | Понт         | ≥2,5         |
| 15    | <i>Raphia senescens</i> <sup>1</sup>     | Veneridae    | Вехнечетвертичные отложения Понта        | Понт         | ≥12–14       |
| 16    | <i>Unio pictorum</i> <sup>1</sup>        | Unionidae    | Озерные, речные                          | Пресноводный | ≤2           |
| 17    | <i>Valvata piscinalis</i> <sup>1</sup>   | Valvatidae   | Озерные, речные                          | Пресноводный | ≤2           |
| 18    | <i>Viviparus viviparus</i> <sup>1</sup>  | Viviparidae  | Озерные, речные                          | Пресноводный | ≤2           |

Примечание. Экологические характеристики по данным:

<sup>1</sup> [Невесская, 1965];

<sup>2</sup> [Янина, 2005];

<sup>3</sup> [Nevesskaja, 2007];

<sup>4</sup> [Определитель рыб и беспозвоночных..., 2013];

<sup>5</sup> [Янина, 2014].

Таблица 2

## Результаты люминесцентного датирования, скважина MN-1

| № п/п | Лаб. номер | Интервал керна, м | Эквивалентная доза, Гр | Скорость накопления дозы, Гр/тыс. лет | Кол-во ал. | Весовая влажность, % | Возраст по полевым шпатам, тыс. лет |
|-------|------------|-------------------|------------------------|---------------------------------------|------------|----------------------|-------------------------------------|
| 1     | 180856     | 27,8–27,9         | 351,0±10,9             | 3,22±0,11                             | 11         | 25                   | 109,1±5,7                           |
| 2     | 180857     | 29,1–29,2         | 388,2±22,0             | 3,41±0,12                             | 12         | 25                   | 113,9±8,3                           |
| 3     | 180858     | 31,9–32,0         | 359,0±9,9              | 3,28±0,12                             | 11         | 25                   | 109,4±5,7                           |
| 4     | 180865     | 33,2–33,3         | 392,5±8,9              | 3,29±0,12                             | 12         | 25                   | 119,3±5,3                           |
| 5     | 180861     | 36,6–36,7         | 368,3±12,2             | 3,25±0,11                             | 12         | 25                   | 113,3±6,0                           |
| 6     | 180862     | 36,9–37,0         | 320,3±18,1             | 2,65±0,10                             | 12         | 25                   | 120,9±8,9                           |

Значения образцов из озерных (180856) и лагунно-лиманных (180857–58, 180865, 180861) отложений оказались средними для полученной серии – в диапазоне около 2,8–3,4 Гр/тыс. лет, образец (180862) из нижней, более древней части керна, характеризуется относительно низким значением скорости накопления дозы – в районе 2,6–2,8 Гр/тыс. лет. В серии образцов, отобранных из отложений, включающих черноморскую фауну моллюсков, наблюдается инверсия, однако с учетом доверительного интервала диапазоны возможного возраста каждого из образцов пересекаются с предыдущим и последующим. Данное явление объясняется высокими темпами осадконакопления в относительно короткий период времени.

Как и для образцов скважины MN-1, возраст отложений скважины OL-1 был получен по полевым шпатам с помощью протокола ИКСЛ<sub>290</sub> [Buylaert et al., 2012]. Люминесцентное датирование отложений скважины OL-1 было проведено по пяти образцам. Три нижних образца показали, что способность полевого шпата накапливать люминесцентный сигнал достигла предела (возраст отложений не моложе 350 тыс. лет), а навески четвертого образца из-за нестабильного сигнала были признаны непригодными для датирования. Результаты датирования представлены в таблице 3.

В итоге возраст толщи суглинистых карангатско-гирканских отложений, вскрытых в скважине OL-1, был оценен в 121,0±10,5 тыс. лет.

Таблица 3

## Результаты ОСЛ-датирования, скважина OL-1

| № п/п | Лаб. номер | Интервал керна, м | Эквивалентная доза, Гр | Скорость накопления дозы, Гр/тыс. лет | Кол-во ал. | Весовая влажность, % | ОСЛ возраст по полевым шпатам, тыс. лет |
|-------|------------|-------------------|------------------------|---------------------------------------|------------|----------------------|-----------------------------------------|
| 1     | 190876     | 20,2–20,1         | 352,2±27,2             | 2,9±0,1                               | 5          | 33                   | 121,0±10,5                              |

Таким образом, отложения, отнесенные на основе малакофаунистического анализа к карангатскому, карангатско-гирканскому и гирканскому времени, накапливались в очень узком диапазоне времени – около 119–109 тыс. л. н., или с учетом доверительного интервала около 120–105 тыс. л. н. Возраст карангатских отложений, судя по датировкам, находится в диапазоне 120–110 тыс. л. н., карангатско-гирканского горизонта – в диапазоне 110–105 тыс. л. н.

Верхнечетвертичные отложения, вскрытые в скважинах, имеют схожее фациально-литологическое строение – осадки сложены преимущественно суглинистыми и глинистыми фациями, накопившимися в условиях застойных водоемов. В керне

скважин PR-1 и MN-1 был выделен карангатский и карангатско-гирканский комплексы моллюсков. Видовой состав карангатского комплекса в обеих скважинах характеризует относительно тепловодный водоем с соленостью не ниже 18‰. По-видимому, достаточно мощные водные массы карангатской трансгрессии проникали в восточном направлении на 250–300 км без существенного влияния выпадающих в Маньчжурскую депрессию водотоков (соленость карангатского бассейна оценивается в 20–24‰ [Федоров, 1963]).

Выше осадков карангатского времени и в керне скважин PR-1 и MN-1 наблюдается одновременное нахождение в составе отложений как карангатской, так и гирканской фауны моллюсков. Видимо, по

достижении водораздела с Азово-Черноморским бассейном воды гирканской трансгрессии Каспия начали разгружаться в Манычскую депрессию в то время, когда в пределах депрессии еще существовал залив карангатского бассейна. Произошло существенное опреснение водоема – стеногалинные виды исчезли из состава малакофаунистических комплексов. Соленость существовавшего водоема на месте современного оз. Маныч-Гудило не могла превышать 14‰. Позднее, судя по видовому составу малакофаунистических комплексов, воды карангатского бассейна покинули центральную часть Манычской депрессии.

В керне самой восточной скважины OL-1 также были обнаружены следы обитания эвригалинной черноморской фауны в составе гирканского малакофаунистического комплекса, что может быть свидетельством того, что воды карангатской трансгрессии могли подходить к порогу Зунда Толга, однако условия в восточной части залива, очевидно, были крайне неблагоприятны для черноморской фауны.

Результаты геохронологического анализа отложений скважин MN-1 и OL-1 позволили определить временные рамки выделенных на основе биостратиграфического анализа событий.

Возраст карангатской ингрессии в центральной части Манычской депрессии определен в диапазоне ~120–110 тыс. лет (рис. 4А), что соответствует второй (максимальной) фазе карангатской трансгрессии, установленной по результатам изучения отложений стратотипических разрезов карангатских отложений на берегах Керченского пролива [Курбанов и др., 2019, 2020; Семиколенных и др., 2023]. В климатическом отношении существование залива отвечает второй половине микулинского межледникового (МИС 5е) и большей части курголовского стадия ранневалдайского оледенения (МИС 5d), или, согласно [Kukla et al., 1997], эемскому межледниковью *sensu lato*. В Каспии в это время существовал изолированный тепловодный позднехазарский бассейн с соленостью от 10–12‰ в его северной части до 14–15‰ в южной [Yanina, 2020]; его уровень не превышал –10 м [Свиточ, 2014].

Залив с одновременным обитанием в нем и карангатской, и гирканской фауны моллюсков, судя по результатам датирования, существовал в Манычской депрессии 110–105 тыс. л. н. (см. рис. 4Б), что отвечает третьей фазе карангатской трансгрессии [Курбанов и др., 2019; Семиколенных и др., 2023] и началу крутицкого интерстадиала ранневалдайского оледенения (МИС 5с). Из-за притока солоноватых вод гирканского бассейна залив существенно опреснился, соленость в районе современного оз. Маныч-Гудило, судя по составу малакофаунистических комплексов, не превышала 14‰.

По-видимому, центральная часть депрессии уже не испытывала влияния карангатского бассейна, а водоем, существовавший в ее пределах, представлял собой в некотором роде реликт морского залива, что позволило гирканским видам в сравнительно короткий промежуток времени вытеснить морскую, умеренно стеногалинную фауну.

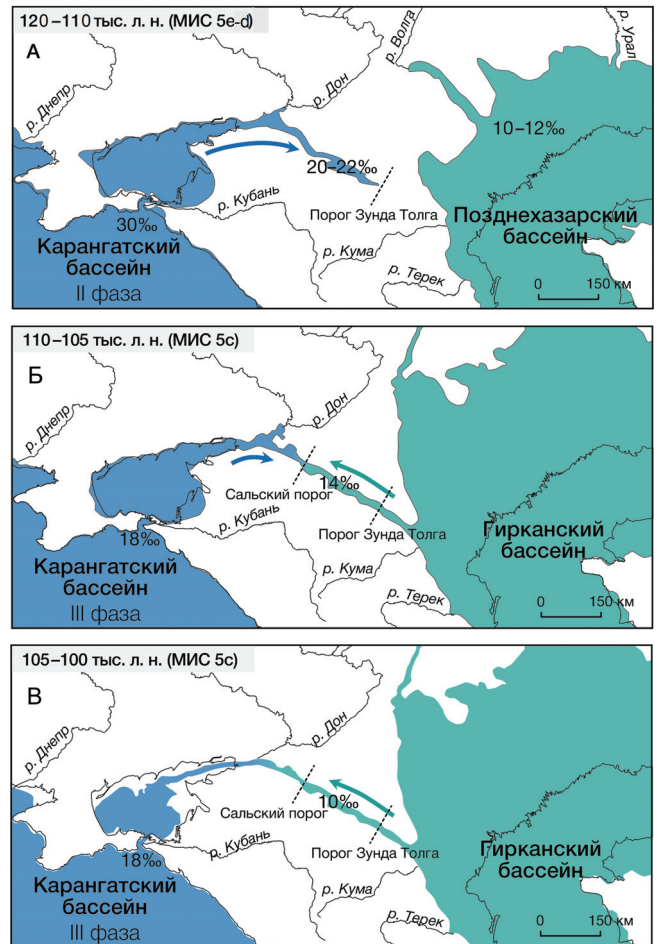


Рис. 4. Палеогеографическая схема карангатского и карангатско-гирканского этапов истории развития Манычской депрессии

Fig. 4. Paleogeographic scheme of the Karangatian and Karangatian-Hyrkanian stages of the history of the Manych Depression

В западной части Манычской депрессии по результатам анализа бурового материала [Попов, 1983] было отмечено чередование осадков, содержащих карангатско-гирканский и гирканский малакофаунистические комплексы. Скорее всего, появившиеся вновь в западной части депрессии морские виды моллюсков маркируют проникновение вод третьей фазы карангатской трансгрессии, которые не смогли преодолеть Сальский порог и повторно занять центральную часть депрессии. Переслаивание гирканских и карангатских отложений



наблюдалось только в нескольких скважинах близ устья р. Большой Егорлык [Попов, 1983], возможно, повторное появление черноморских видов в составе гирканских комплексов могло быть и результатом их переотложения.

К 105 тыс. л. н. уровень карангатского бассейна снизился, и его воды покинули пределы Манычской депрессии, в то время как Каспий продолжал сбрасывать гирканские трансгрессивные воды в Понт до ~100 тыс. л. н. (МИС 5с) (рис. 4В). Свидетельством функционирования гирканского пролива является присутствие представителей гирканской малакофауны в осадках завершающей стадии карангатского бассейна на черноморском шельфе [Сорокин и др., 2022].

### ВЫВОДЫ

Ингрессия морского бассейна Понта проникала в пределы Манычской депрессии вплоть до поро-

га Зунда Толга во вторую фазу карангатской трансгрессии в период ~120–110 тыс. л. н. (МИС 5e–d, микулинское межледниковье – курголовский стадиал валдайской ледниковой эпохи). Соленость залива в районе современного озера Маныч-Гудило достигала 20–22‰, у порога Зунда Толга водоем был сильно опреснен – до 10‰ и ниже.

Приток вод гирканской трансгрессии Каспия в залив центральной части Манычской депрессии имел место 110–105 тыс. л. н., что отвечает третьей фазе карангатской трансгрессии (МИС 5с, начало крутицкого интерстадиала валдайской ледниковой эпохи). Солоноватые каспийские воды опреснили карангатский залив в районе современного оз. Маныч-Гудило до 14‰ и ниже.

Воды карангатского бассейна окончательно покинули пределы Манычской депрессии около 105 тыс. л. н.; функционирование гирканского пролива продолжалось до ~100 тыс. л. н.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 22-27-00164). Авторы выражают благодарность профессору Орхусского университета (Дания) доктору Э.Ш. Мюррею за помощь в интерпретации полученных результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геология шельфа УССР. Керченский пролив / отв. ред. Д.Е. Макаренко. Киев: Наукова думка, 1981. 160 с.
- Горецкий Г.И. О возрастных соотношениях осадков узунларской и карангатской трансгрессий // Бюлл. МОИП. Отд. геолог. 1955. Т. 30. № 2. С. 13–29.
- Курбанов Р.Н., Семиколенных Д.В., Янина Т.А., Тюнин Н.А., Мюррей Э.С. Новые данные о возрасте карангатской трансгрессии Черного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 6. С. 139–145.
- Курбанов Р.Н., Янина Т.А., Мюррей А.С., Борисова О.К. Гирканский этап в позднеплейстоценовой истории Манычской депрессии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 3. С. 77–88.
- Курбанов Р.Н., Янина Т.А., Мюррей А.С., Семиколенных Д.В., Свиштунов М.И., Штыркова Е.И. Возраст Карангатской трансгрессии (поздний плейстоцен) Черного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2019. № 6. С. 29–39.
- Невесская Л.А. Позднечетвертичные двустворчатые моллюски Черного моря, их систематика и экология. М.: Изд-во АН СССР, 1965. 392 с.
- Рыбы и моллюски // Определитель рыб и беспозвоночных Каспийского моря / Н.Г. Богуцкая, П.В. Кияшко, А.М. Насека, М.И. Орлова. СПб.; М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. Т. 1. 543 с.
- Попов Г.И. История Манычского пролива в связи со стратиграфией черноморских и каспийских отложений // Бюлл. МОИП. Отд. геолог. 1955. Т. 20. № 2. С. 31–49.
- Попов Г.И. Плейстоцен Черноморско-Каспийских проливов. М.: Наука, 1983. 216 с.
- Свиточ А.А. Стратотипы карангата Таманского и Керченского полуостровов (сравнительный анализ) // Доклады Академии наук. 2009. № 424. С. 669–671.
- Свиточ А.А. Большой Каспий: строение и история развития. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2014. 272 с.
- Семиколенных Д.В., Курбанов Р.Н., Янина Т.А. Хронология карангатской трансгрессии Черного моря на основе данных люминесцентного датирования // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 1. С. 1–16.
- Сорокин В.М., Янина Т.А., Романюк Б.Ф. Новые находки карангатских отложений в восточной части Черного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 5. С. 113–119.
- Федоров П.В. Стратиграфия четвертичных отложений Крымско-Кавказского побережья и некоторые вопросы геологической истории Черного моря. М.: АН СССР, 1963. 164 с.
- Янина Т.А. Дидакны Понто-Каспия. М.; Смоленск: Маджента, 2005. 300 с.
- Янина Т.А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. М: Геогр. факультет МГУ, 2012. 264 с.
- Янина Т.А., Сорокин В.М., Безродных Ю.П., Романюк Б.Ф. Гирканский этап в плейстоценовой истории Каспийского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 3. С. 3–9.
- Янко В.В., Фролов В.Т., Мотненко И.В. Фораминиферы и литология стратотипического разреза карангатского горизонта (антропоген Керченского полуострова) // Бюлл. МОИП. Отд. Геологии. 1990. № 65. С. 83–97.
- Buylaert J.-P., Jain M., Murray A.S., Thomsen K.J., Thiel C., Sohbati R. A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments, *Boreas*, 2012, vol. 41, no. 3, p. 435–451.

- Kukla G., McManus J.F., Rousseau D.D., Chuine I. How long was the last interglacial, *Quaternary Science Reviews*, 1997, no. 16, p. 605–612.
- Nevejskaja L.A. History of the genus *Didacna* (Bivalvia: Cardiidae), *Paleontological Journal*, 2007, vol. 41, no. 9, p. 861–949.
- Yanina T.A. Environmental Variability of the Ponto-Caspian and Mediterranean Basins During the Last Climatic Macrocycle, *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 4, p. 6–23.

Поступила в редакцию 10.03.2023

После доработки 23.05.2023

Принята к публикации 27.07.2023

## INGRESSION OF THE KARANGATIAN SEA INTO THE MANYCH DEPRESSION (LATE PLEISTOCENE)

D.V. Semikolennykh<sup>1</sup>, R.N. Kurbanov<sup>2</sup>, T.A. Yanina<sup>3</sup>

<sup>1–3</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography

<sup>1,2</sup> Institute of Geography of Russian Academy of Science, Department of Quaternary Paleogeography

<sup>1</sup> Engineer, Ph.D. in Geography; e-mail: aristova@igras.ru

<sup>2</sup> Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: kurbanov@igras.ru

<sup>3</sup> Head of the laboratory, D.Sc. in Geography; e-mail: paleo@inbox.ru

The work presents the results of paleogeographic study, including facies-lithological, malacofaunistic and luminescence analyses, of three boreholes core drilled in the central part of the Manych Depression, which made it possible to determine the time and stages of the existence of the Karangatian ingressive bay in the Manych Depression, and to correlate the latter with phases of the Karangatian transgression identified earlier on the basis of luminescence dating. Based on the results of the study it was found that: 1) the Karangatian Sea penetrated into the Manych Depression during the second phase of transgression in the time interval of ~120–110 ka years ago (MIS 5e–d). The salinity of the bay in the area of the modern Manych-Gudilo Lake reached 20–22‰; 2) the inflow of water of the Hyrcanian transgression of the Caspian into the bay in the central part of the Manych Depression took place 110–105 ka years ago, which corresponds to the third phase of the Karangatian transgression (MIS 5c). The brackish Caspian waters desalinated the Karangatian Bay in the area of the modern Manych-Gudilo Lake down to 14‰ and below; 3) the waters of the Karangatian Sea finally left the Manych Depression about 105 ka years ago (MIS 5c).

**Keywords:** biostratigraphy, geochronology, OSL dating, malacofauna, Caspian Sea, Black Sea

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project 22-27-00164). The authors are grateful to Dr. A.S. Murray, Professor of the Aarhus university (Denmark) for his assistance in interpreting the results.

## REFERENCES

- Buylaert J.-P., Jain M., Murray A.S., Thomsen K.J., Thiel C., Sohbati R. A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments, *Boreas*, 2012, vol. 41, no. 3, p. 435–451.
- Fedorov P.V. *Stratigrafiya chetvertichnyh otlozhenij Krymsko-Kavkazskogo poberezh'ya i nekotorye voprosy geologicheskoy istorii Chernogo morya* [Stratigraphy of the Quaternary deposits of the Crimean-Caucasian coast and some questions of the geological history of the Black Sea], Moscow, AN SSSR Publ., 1963, 164 p. (In Russian)
- Geologiya shelfa Ukrainy. Kerchenskii proliv [Geology of the Ukrainian shelf. The Kerch Strait], Kiev, Naukova dumka Publ., 1981, 186 p. (In Russian)
- Goretskiy G.I. O vozrastnyh sootnosheniyah osadkov uzunlarskoj i karangatskoj transgressij [On the age correlations of sediments of the Uzunlar and Karangat transgressions], *Bull. MOIP. Otd. Geologii*, 1955, no. 2, p. 13–29. (In Russian)
- Kukla G., McManus J.F., Rousseau D.D., Chuine I. How long was the last interglacial, *Quaternary Science Reviews*, 1997, no. 16, p. 605–612.
- Kurbanov P.N., Yanina T.A., Murrey A., Borisova O.K. Girkanskij etap v pozdne-pleistotsenovej istorii Manychskoj depressii [Hyrcanian stage in the Late Pleistocene history of the Manych depression], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 3, p. 77–88. (In Russian)
- Kurbanov R.N., Semikolennykh D.V., Yanina T.A., Tyunin N.A., Murray A.S. Novye dannye o vozraste karangatskoj transgressii Chernogo morya [New data on the age of the Karangatian transgression of the Black Sea], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 6, p. 139–145. (In Russian)
- Kurbanov R.N., Yanina T.A., Murray A.S., Semikolennykh D.V., Svistunov M.I., Shtyrkova E.I. Vozrast karangatskoj transgressii (pozdnij pleystotsen) Chornogo morya [The age of the Karangatian (Late Pleistocene)

- transgression of the Black Sea], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2019, no. 6, p. 29–39. (In Russian)
- Neveskaja L.A. History of the genus *Didacna* (Bivalvia: Cardiidae), *Paleontological Journal*, 2007, vol. 41, no. 9, p. 861–949.
- Neveskaya L.A. *Pozdnechetvertichnye dvustvorchatye mollyuski Chernogo morya, ikh sistematika i ekologiya* [Late Quaternary Bivalves of the Black Sea, Their Systematics and Ecology], tr. Paleontol. inst. Akad. Nauk SSSR, Moscow, Nauka Publ., 1965, 392 p. (In Russian)
- Opredelitel' ryb i bespozvonochnykh Kaspijskogo morya, t. 1, Ryby i mollyuski* [Key to fish and invertebrates of the Caspian Sea, vol. 1, Fish and shellfish], N.G. Boguckaya, P.V. Kiyashko, A.M. Naseka, M.I. Orlova (eds.), St Petersburg, Moscow, Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2013, 543 p. (In Russian)
- Popov G.I. Istoriya Manychskogo proliva v svyazi so stratigrafiej chernomorskih i kaspijskih otlozhenij [History of the Manych Strait in the context of the stratigraphy of the Black Sea and Caspian deposits], *Bull. MOIP, Otd. Geologii*, 1955, no. 2, p. 31–49. (In Russian)
- Popov G.I. *Pleistocen Chernomorsko-Kaspijskih prolivov* [Pleistocene of the Black Sea and Caspian Sea passages], Moscow, Nauka Publ., 1983, 216 p. (In Russian)
- Semikolennykh D.V., Kurbanov R.N., Yanina T.A. Hronologiya karangatskoj transgressii Chernogo morya na osnove dannyh lyuminescentnogo datirovaniya [Chronology of the Karangatian Transgression of the Black Sea according to the Luminescence Dating], *Izv. RAN, Ser. geogr.*, 2023, no. 1, p. 1–16. (In Russian)
- Sorokin V.M., Yanina T.A., Romanyuk B.F. Novye nahodki karangatskih otlozhenij v vostochnoj chasti Chernogo morya [New finds of Karangatian deposits in the eastern part of the Black Sea], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 4, Geol.*, 2022, no. 5, p. 113–119. (In Russian)
- Svitoch A.A. *Bol'shoj Kaspij: stroenie i istoriya razvitiya* [Great Caspian: structure and history of development], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2014, 272 p. (In Russian)
- Svitoch A.A. Stratotipy karangata Tamanskogo i Kerchenskogo poluostrovov (sravnitel'nyj analiz) [Karangatian stratotypes of the Taman and Kerch Peninsulas (comparative analysis)], *Dokl. Akad. Nauk*, 2009, no. 424, p. 669–671. (In Russian)
- Yanina T.A. *Didakny Ponto-Kaspiya* [Didacna of the Ponto-Caspian], Moscow, Smolensk, Madzhenta Publ., 2005, 300 p. (In Russian)
- Yanina T.A. Environmental Variability of the Ponto-Caspian and Mediterranean Basins During the Last Climatic Macrocycle, *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 4, p. 6–23.
- Yanina T.A. *Neoplejstocen Ponto-Kaspiya: biostratigrafiya, paleogeografiya, korrelyatsiya* [Neo-Pleistocene of the Ponto-Caspian: biostratigraphy, paleogeography, correlation], Moscow, MGU Publ., 2012, 264 p. (In Russian)
- Yanina T.A., Sorokin V.M., Bezrodnykh Yu.P., Romanyuk B.F. Girkanskij etap v plejstocenovoj istorii Kaspijskogo morya [Hyrcanian stage in the Pleistocene history of the Caspian Sea], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, no. 3, p. 3–9. (In Russian)
- Yanko V.V., Frolov V.T., Motnenko I.V. Foraminifery i litologiya stratotipicheskogo razreza karangatskogo gorizonta (antropogen Kerchenskogo poluostrova) [Foraminifera and lithology of the stratotype section of the Karangatian layer (the Quaternary of the Kerch Peninsula)], *Bull. MOIP. Otd. Geologii*, 1990, no. 65, p. 83–97. (In Russian)

Received 10.03.2023

Revised 23.05.2023

Accepted 27.07.2023



УДК 551.583: 551.89(497.1-43)

## ПАЛИНОКЛИМАТОСТРАТИГРАФИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПЕЩЕРЫ ТРЛИЦА (ЧЕРНОГОРИЯ)

Н.С. Болиховская<sup>1</sup>, В.А. Ульянов<sup>2</sup>, М.В. Шуньков<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,

<sup>3</sup> Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск, отдел археологии каменного века

<sup>1</sup> Научно-исследовательская лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, вед. науч. сотр.; кафедра геоморфологии и палеогеографии, проф., д-р геогр. наук; e-mail: natbolikh@mail.ru

<sup>2</sup> Кафедра геоморфологии и палеогеографии, науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: v.a.ulyanov@yandex.ru

<sup>3</sup> Зав. отделом, д-р ист. наук, чл.-корр. РАН; e-mail: shunkov@archaeology.nsc.ru

По результатам палинологического анализа выполнено климатостратиграфическое расчленение плейстоценовых отложений пещеры Трлица, расположенной в окрестностях г. Плевля на севере Черногории. Палинологическая запись подтверждает значительные перерывы в осадконакоплении, выявленные при полевом литолого-генетическом анализе. Реконструированы изменения ландшафтно-климатических условий, происходившие на протяжении времени формирования изученной плейстоценовой толщи. Установлены особенности флоры и растительности трех этапов заключительной части раннего плейстоцена, отвечающих МИС 22, МИС 21, МИС 20, а также трех этапов первой половины среднего плейстоцена, соответствующих МИС 19, МИС 18 и МИС 15. На протяжении всего периода формирования плейстоценовых отложений Трлицы в горных ландшафтах окрестностей пещеры были развиты преимущественно лесные формации, испытывавшие значительные трансформации их состава при смене межледниковых обстановок этапами похолоданий. Материалы палинологического анализа четвертичных осадков Черногории весьма скудны. В связи с этим спорово-пыльцевые данные разреза Трлица и установленные климато-фитоценоотические сукцессии трех межледниковых и трех относительно холодных (ледникового ранга) этапов раннего и среднего плейстоцена, представленные в настоящей статье, являются важным вкладом в изучение природной среды плейстоцена Балканского полуострова.

**Ключевые слова:** ранний и средний плейстоцен, спорово-пыльцевой анализ, климатостратиграфия, флора, растительность

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.10

### ВВЕДЕНИЕ

Прогностические модели изменения биоты базируются на изучении закономерностей ее развития в прошлые эпохи. Для выявления закономерностей развития растительности и климата в различных страторайонах Северной Евразии проводятся детальные палинологические исследования опорных разрезов, в которых плейстоценовые отложения представлены наиболее полно и охарактеризованы всем комплексом палеогеографических исследований. На основании подробных палинологических записей изученных опорных разрезов установлены закономерности направленного, ритмического, метакронного и циклического развития растительности и климата равнинных областей Северной Евразии в последние 900 тыс. лет [Болиховская, 2007]. Наряду с этим пристальное внимание уделяется изучению особенностей развития плейстоценовой растительности и климата в горных районах юга Северной Евразии [Болиховская и др., 2011, 2017].

С целью изучения особенностей изменения флоры, растительности и климата плейстоцена в одном из горных районов юго-запада Северной Евразии был выполнен спорово-пыльцевой анализ толщ рыхлых осадков пещеры Трлица (43°20'38" с. ш., 19°23'00,2" в. д.), расположенной на севере Республики Черногория, в 2,5 км юго-восточнее г. Плевля (рис. 1). Геоморфологические исследования и полевой литолого-генетический анализ плейстоценовых отложений пещеры проведен В.А. Ульяновым.

Палеоботанические материалы по плейстоценовым осадкам Черногории весьма скудны. Детальный палинологический анализ с целью климатостратиграфического расчленения и палиноиндикации ландшафтно-климатических условий их формирования ранее не проводился. Полученные для разреза Трлица спорово-пыльцевые данные и выполненные климато-фитоценоотические реконструкции, представленные в настоящей статье, являются важным вкладом в изучение природной среды плейстоцена Балканского полуострова.



Рис. 1. Расположение пещеры Трлица на севере Черногории

Fig. 1. Location of the Trlica cave in northern Montenegro

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пещера Трлица расположена на склоне обширной межгорной депрессии тектонического происхождения, на абс. высоте 925 м, в 1,6 км к северо-западу от устья каньона р. Чеотина. Склон юго-западной экспозиции, крутизной 15–20°, покрыт разреженным сосновым лесом и ксерофитным кустарником. Почвенный покров на склоне сильно редуцирован, местами на поверхность выходят глыбы шпаттированных известняков триаса, в массиве которых выработана пещера. Междуречные пространства в ближайших окрестностях пещеры представляют собой пологохолмистую поверхность (абс. выс. 1000–1050 м), с многочисленными карстовыми блюдцами и воронками размерами от 30 до 100 м в плане при относительной глубине от 5 до 15 м. Чехол рыхлых отложений на междуречьях и склонах депрессии сильно редуцирован, повсеместно преобладают выходы скального известняка.

Пещера Трлица является сохранившимся фрагментом нижней части карстового колодца, верхняя часть которого (карстовая воронка с понором) была срезана в процессе склоновой денудации. Пещера вскрыта и частично уничтожена при строительстве

шоссе. Уцелевшая часть представляет собой карстовую полость, большая часть которой заполнена рыхлыми отложениями.

В толще плейстоценовых отложений Трлицы (рис. 2А) выделено 12 слоев общей мощностью более 5,5 м (рис. 2Б) [Деревянко и др., 2011]. Период их образования, судя по литологическим признакам, палеофаунистическим и палинологическим данным, характеризовался несколькими продолжительными седиментационными перерывами. Накопление осадков слоев 10–12 происходило в субаквальной обстановке, что подтверждено присутствием в них пресноводных зеленых водорослей *Botryococcus* и *Pediastrum*, а также высоким содержанием пыльцы водных и прибрежно-водных растений и спор *Salvinia natans*. Осадки средней толщи (слои 5–9) формировались преимущественно делювиально-пролювиальными процессами. Верхняя пачка отложений мощностью ~1,5 м (слои 1–4) представляет собой почвенно-осадочный комплекс. Об этом свидетельствуют результаты полевых исследований, тафономические особенности выделенных из этих слоев палиноморф, а также эколого-ценотические характеристики продуцировавших пыльцу и споры растений.





Рис. 2. Пещера Трлица:

А – карстовая полость пещеры, вскрытая при строительстве шоссе; Б – слои 1–12 плейстоценовых отложений пещеры

Fig. 2. The Trlica cave:

А – the karst cavity of the cave, opened during the construction of a highway; Б – layers 1–12 of Pleistocene deposits in the cave

При изучении представительной коллекции костных остатков мелких и крупных млекопитающих, отобранных из отложений слоев 5–6 и 10–11, И.А. Вислобоковой и А.К. Агаджаняном [2016] выделены два фаунистических комплекса. Фаунистический комплекс слоев 10 и 11 датирован ими второй половиной раннего плейстоцена – от субхрона Олдувей до середины позднего виллафранка (т. е. хронологическим интервалом от ~1,8 до ~1,4 млн лет). Фауна мелких млекопитающих слоев 5 и 6 по своему эволюционному уровню отвечает началу среднего плейстоцена (т. е. ее абсолютный возраст ~0,780 млн лет).

Как указывалось выше, полноценное палинологическое изучение плейстоценовых разрезов Черногории ранее не проводилось. Немногочисленные палиноморфы были получены J. Argant [Argant, Dimitrijević, 2007], выполнившей анализ шести образцов копролитов гиены (*Pachycrocuta brevirostris*) из нижней части отложений пещеры Трлица, содержащих костные остатки раннеплейстоценовой фауны. Пять образцов содержали единичные зерна

пыльцы и спор. Реконструкции растительности сделаны по данным одного образца, из которого выделены 76 зерен – пыльца ольхи, дуба, лещины, сосны, пихты, бука, березы, граба, самшита (*Buxus*), можжевельника, злаков, осоковых, подорожника, вереска (*Calluna*, Ericaceae), рогоза и споры *Sphagnum*. На основании эколого-ценотического анализа этих таксонов сделан вывод о преобладании в изученный отрезок раннего плейстоцена лесных биотопов при относительно прохладном и влажном климате. Предположено, что самые высокие уровни горного склона занимали древостой из сосны, пихты и бука, а также открытые биотопы с можжевельником, вереском, самшитом и травами. На склонах росли дуб и граб, а в днище котловины – заболоченные ольшаники с участием в наземном покрове сфагновых мхов.

Проведенный Н.С. Болиховской в 2012–2015 гг. рекогносцировочный анализ рыхлых отложений пещеры Трлица показал, что осадки большинства слоев имеют относительно низкое содержание пыльцы и спор (2–5 зерен/г осадка). Применение модифи-



цированной версии сепарационной методики, разработанной для извлечения пыльцы и спор из субэвальных и бедных растительными микроостатками осадков плейстоцена [Болиховская, 1995], а также обработка больших (50–100 г) порций породы позволили получить палинологические данные для предварительных выводов о геологическом возрасте пещерных отложений и изменениях растительности во время их формирования [Bolikhovskaya, Shunkov, 2016]. В дальнейших исследованиях для получения репрезентативных данных предпринято выделение пыльцы и спор из новых (50–100 г) порций образцов пещерных осадков. При дополнительном анализе 39 образцов репрезентативные спорово-пыльцевые спектры получены для 24 проб, характеризующих все слои рыхлых осадков пещеры. Вкупе с автохтонными палинофлорами они составили палинологическую запись, ставшую основой климатостратиграфического расчленения плейстоценовых отложений Трлицы и выявления особенностей изменения флоры и растительности в основные этапы их образования. Для реконструкции палеорастительности использовались субрецентные спорово-пыльцевые спектры современных разнофациальных отложений, образцы которых были отобраны на пробных площадках фитоценозов различных горных поясов окружающей территории. Как показали результаты анализа (им будет посвящена специальная статья), субрецентные спектры большей частью адекватно отражают продуцирующие пыльцу и споры фитоценозы изучаемого горного района.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Литолого-генетическая характеристика отложений.** Заполняющие самые нижние уровни пещеры осадки слоя 12 представляют собой отложения постоянного водотока со стабильным гидрологическим режимом, о чем свидетельствует хорошая сортировка песчано-гравийного материала. В то же время, несмотря повсеместное распространение известняковых пород, воды отличались достаточно высокой химической агрессивностью, о чем свидетельствует некарбонатность отложений слоя 12. В нижней части слоя встречаются обломки коренных известняков удлиненной формы с острыми гранями, образование которых обычно характерно для обстановок морозного выветривания. Вероятно, слой 12 формировался в достаточно влажных и прохладных климатических условиях, когда водосборной площади карстовой воронки хватало для обеспечения непрерывного функционирования подземного ручья в пещере. Сама же воронка являлась коллектором не только влаги, но и органиче-

ских остатков, обусловивших агрессивный кислотный химизм водной среды.

В отложениях слоев 11, 10 наблюдается последовательное ухудшение сортированности материала и появление прослоев переотложенной из миоценовых толщ сильновыветрелой гальки, для транзита которой необходимы в несколько раз более высокие скорости водного потока, чем для транспортировки дресвяно-песчаного материала слоя 12. Это свидетельствует о возросшей пульсационной активности водотока, когда фазы повышенной обводненности чередовались с фазами водного дефицита, и характер транзита материала начал склоняться к пролювиальному типу. Строение и состав слоя 10 отражают дальнейшее усиление нестабильности функционирования водотока. Слой состоит из вложенных друг в друга вследствие локальных перемывов прослоев суглинков, супесей и песков, в различной степени сцементированных карбонатным цементом. Характерны включения крупных фрагментов костей и зубов травоядных животных, местами формирующих сплошные прослои. Судя по характеру омарганцевания костного материала, мацерация его происходила в промежуточном коллекторе с агрессивной закисной обстановкой – возможно, в заболоченном водоеме в днище поля над пещерой – и лишь потом осуществлялся пролювиальный транзит на место нынешнего захоронения в слое.

Отложения слоя 9, вложенные в отложения слоя 10 с размывом, знаменующим седиментационный перерыв неустановленной продолжительности, характеризуются увеличением содержания галечно-щебнистой фракции с четкой косой слоистостью в своем строении. Это отражает усиление осадко-накопления по флювиальному типу и, вероятно, соответствует стадии относительной гумидизации климата.

Отложения слоя 8 вложены в слой 9 с угловым несогласием, частично перемывая их прикровельную часть. Для осадка слоя 8 характерно интенсивное развитие вторичного омарганцевания, свидетельствующее, вероятно, о влажных и, возможно, прохладных условиях. Вместе с тем отмечается уменьшение гранулометрического состава галечной фракции, увеличение содержания алевроитистых супесей в составе заполнителя, а в прикровельной части на контакте со слоем 7 – развитие карбонатной цементации. По-видимому, осадок верхней части слоя 8 формировался в условиях пониженной водообеспеченности при постепенном переходе к потеплению и снижению гумидности климата.

Палеогеографическая интерпретация литологических особенностей слоя 7 противоречива. С одной стороны, слой 7 выделен как горизонт мощной карбонатной цементации, предполагающий поступ-

ление сильно насыщенных карбонатными растворами вод при отсутствии промывного режима. Это свидетельствует о цементации в теплую суховатую фазу. С другой стороны, в составе слоя 7 отмечается массовое появление прочных железистых новообразований правильной сферической формы размером 1–2 мм. Подобные оолиты, состоящие преимущественно из гидроокислов железа, в настоящее время образуются в заболоченных водоемах Центральной и Северной Европы и имеют историческое название «озерная руда». Включения не выветрелого острогранного известнякового щебня позволяют охарактеризовать климатические условия как влажные и прохладные. Очевидно, осадок слоя 7 является полигенетическим образованием, в составе которого присутствует сформированный в различных геохимических обстановках материал, впоследствии переотложенный пролювиальным потоком. Поверхность кровли слоя 7 неровная, с понижениями и буграми вертикальной амплитудой 10–30 см, местами с кавернами, сформировавшимися в результате падения капель с выступов стен и свода пещеры, очень прочная. Вероятно, она маркирует поверхность длительного экспонирования и соответствует длительному перерыву осадконакопления.

Отложения слоя 6, заполняющие понижения в кровле слоя 7, представлены в разрезе фрагментарно. По вещественному составу представляют собой зону постепенного перехода от слоя 7 к вышележащей части разреза. Слой 6 отражает начало осадконакопления в пещере в субаэральных условиях. Очевидно, к этому времени карстовая воронка над пещерой была разрушена и перестала выполнять функции водосбора.

Слой 5 представляет собой пачку охристо-желтых алевритистых суглинков субаэрального генезиса мощностью 1,0–1,3 м. Отсутствие локальных перемыслов свидетельствует об обстановке слабой увлажненности. В слое присутствуют включения округлого и эллипсоидного сечения (до 25 см в поперечнике), похожие на заполнение ходов крупных землероев (возможно, дикобраза, остатки которого встречаются во всей толще слоев 10–5 [Вислобокова, Агаджанян, 2016]). Это свидетельствует о том, что во время формирования слоя 5 пещера уже могла являться зоной постоянного обитания достаточно крупных наземных животных. Кровля слоя 5 бронирована массивной, местами монолитной толщиной карбонатной цементации заполнителя мощностью от 20 до 40 см. На ней залегают резко отличающиеся по своим литологическим характеристикам осадки слоев 4–1, что свидетельствует о смене условий осадконакопления и длительном седиментационном перерыве после формирования слоя 5.

Слои 4–1 представлены суглинками средними и тяжелыми красно-коричневого цвета, обогащенными щебнем, поступавшим со стен пещеры в результате десквамации. В нижней части слоя 4 прослеживаются несколько горизонтов образования натечных корок из крупнокристаллического шестоватого кальцита. Мощность натечных корок достигает 2–7 см, на отдельных участках на них сформированы сталагмиты высотой до 20 см и до 6 см в диаметре. Микрослои осажженного кальцита отличаются высокой чистотой и прозрачностью, что свидетельствует о стабильности условий формирования, отсутствии пыли в воздухе и глинистых частиц в карбонатных растворах. Вероятно, формирование его проходило в стабильно влажных климатических условиях.

**Климатостратиграфия и климато-фитоценоотические реконструкции.** Согласно результатам палинотафономических и палиноморфологических исследований, комплекс автохтонной палинофлоры плейстоценовых отложений разреза Трлица составили свыше 100 видов, родов и семейств древесно-кустарниковых, травяно-кустарничковых и высших споровых растений. Группа деревьев и кустарников содержит пыльцу ~60 таксонов: *Taxodiaceae* (cf. *Taxodium*, *Cryptomeria japonica*, cf. *Sciadopitys*, cf. *Sequoia*), *Cupressaceae* (*Cupressus* spp., *Juniperus* spp.), cf. *Podocarpus*, *Pinaceae* (*Tsuga* cf. *canadensis*, *T.* cf. *acullata*, *T.* type *piccolo*, *Keteleeria* sp., *Abies*, *Picea* sect. *Omorica*, *P.* s. *Picea*, *P. schrenkiana*, *Cedrus*, *Pinus* s.g. *Haploxylon*, *Pinus* s. *Cembra*, *Pinus* s. *Strobus*, *P.* s.g. *Diploxylon*, *P. sylvestris*, *Larix*), *Betula* sect. *Costatae*, *B.* s. *Albae*, *B.* cf. *pubescens*, *Betula* (кустарниковая форма), *Alnus incana*, *A. glutinosa*, cf. *Pistacia*, *Parrotia persica*, *Fagus sylvatica*, *Quercus* cf. *ilex*, *Q.* spp., *Carpinus betulus*, *C. orientalis*, *Ostrya* cf. *carpinifolia*, *Corylus avellana*, *Tilia cordata*, *T. argentea/tomentosa*, *Celtis*, *Ulmus*, *Fraxinus*, *Morus*, *Myrica*, *Salix*, *Elaeagnus*, *Humulus*, *Rosaceae* и др. Группа трав и кустарничков включает ~35 таксонов: *Ericales*, *Poaceae*, *Cyperaceae*, *Chenopodiaceae*, *Artemisia* s.g. *Euartemisia*, *A.* s.g. *Seriphidium*, *A.* s.g. *Dracunculus*, *Amaranthaceae*, *Plumbaginaceae*, *Saxifragaceae*, *Apiaceae*, *Polygonaceae*, *Polygonum amphibium*, *Rumex*, *Fabaceae*, *Brassicaceae*, *Lamiaceae*, *Campanulaceae*, *Rubiaceae*, *Plantago*, *Urtica*, *Alliaceae*, *Liliaceae*, *Iridaceae*, *Asteraceae*, *Ambrosia*, *Cichoriaceae*, *Aquatica* (*Alismataceae*, *Typha*, *Sparganium*, *Potamogeton*, *Myriophyllum*, *Lemna*). В группе высших споровых растений: *Bryales*, *Sphagnum*, *Polypodiaceae*, *Pteridium aquilinum*, *Dryopteris filix-mas*, *Ophioglossum*, *Botrychium*, *B.* cf. *matricariifolium*, *Huperzia*, *Lycopodium clavatum*, *Lycopodium* sp., *Equisetum*, *Salvinia natans*.

Изменения состава и процентного содержания основных компонентов спорово-пыльцевых спектров отложений разреза Трлица и характерных таксонов деревьев и кустарников представлены на упрощенной палинологической диаграмме (рис. 3).

На основании всестороннего анализа определенной палинофлоры и репрезентативных спорово-пыльцевых спектров изученного разреза, а также их сопоставления с результатами палинологических исследований плейстоценовых разрезов прилегающих районов Северного Средиземноморья и субрецентными спектрами зональных и локальных растительных сообществ горных ландшафтов в окрестностях г. Плевля, выполнено стратиграфическое расчленение толщи рыхлых отложений пещеры Трлица, определен возраст выделенных климатостратиграфических подразделений, охарактеризованы ландшафтно-климатические условия, особенности флоры и растительности трех межледниковых этапов и трех относительных похолоданий (ледникового ранга) конца раннего и начала среднего плейстоцена. Палинологическая летопись палеогеографических событий внесла коррективы в выводы о климатических условиях формирования горизонтов разреза Трлица, сделанные при их полевом литолого-генетическом анализе.

Присутствие пыльцы субтропических и умеренных неогеновых реликтов – cf. *Podocarpus*, *Keteleeria*, *Tsuga* spp., *Cedrus*, *Cupressus*, *Parrotia persica*, *Celtis*, cf. *Taxodium*, cf. *Sciadopitys*, *Cryptomeria japonica* и др., являющихся показательными компонентами межледниковых флор раннего и первой половины среднего плейстоцена разрезов Средиземноморского историко-флористического региона [Popescu et al., 2010; Manzi et al., 2011; Combourieu-Nebout et al., 2015], подтвердило вывод, сделанный по палеофаунистическим данным [Вислобокова, Агаджанян, 2016], о ранне- и среднеплейстоценовом возрасте рыхлых отложений Трлицы.

Анализ литературных данных о хронологии появления, расцвета и исчезновения экзотических таксонов в плейстоценовых флорах разрезов Средиземноморья [Combourieu-Nebout et al., 2015] свидетельствует о многообразии региональных и локальных особенностей этих процессов. С. Жоаннин с соавторами [Joannin et al., 2007], исходя из материалов палинологического изучения разрезов Италии и Греции, указывают, что для ранне- и среднеплейстоценовых межледниковий центральной части Средиземноморской области было свойственно господство широколиственных и хвойно-широколиственных лесов с субтропическими элементами, тогда как переходным периодам отвечали фазы преобладания лесов из темнохвойных пород (с участием тсуги, кедра и других экзотов).

Отмечается следующая особенность растительности климатических ритмов ледникового ранга: холодным и сухим условиям соответствовали фазы расширения участия степных элементов (*Artemisia*, *Amaranthaceae*, *Chenopodiaceae*), а при похолоданиях и увлажнениях были развиты хвойные леса среднего и высокогорного типа.

В связи тем что в плейстоценовой толще Трлицы фиксируются перерывы в осадконакоплении, свидетельствующие об отсутствии палеогеографической информации для значительных временных отрезков изученного интервала конца раннего и начала среднего плейстоцена, полученные для рыхлых отложений пещеры Трлица палинологические данные позволили относительно подробно рассмотреть сукцессии флоры и растительности установленных межледниковых периодов и лишь отдельные климато-фитоценотические фазы холодных этапов.

Спорово-пыльцевые спектры 18 выделенных палинозон (далее ПЗ) свидетельствуют, что на протяжении всего периода формирования плейстоценовых отложений Трлицы в горных ландшафтах окрестностей пещеры были развиты преимущественно лесные формации, испытывавшие значительные трансформации их состава при смене межледниковых обстановок этапами похолоданий. В теплые этапы доминировали хвойно-широколиственные и широколиственные леса, а во время похолоданий преобладающую роль играли хвойные леса с незначительной примесью широколиственных пород или чистые хвойные древостои.

В настоящее время в исследуемом районе естественная растительность в значительной степени уничтожена: в горах – многовековым выпасом домашнего скота, в межгорной котловине вблизи пещеры Трлица – обширным карьером по добыче бурого угля. В условиях современного умеренно-континентального климата сохранившуюся здесь естественную зональную растительность представляют горные леса. В верхнем горно-лесном поясе развиты хвойные леса из кедровидной сосны (*Pinus peuce*), ели (*Picea abies*), пихты (*Abies alba*) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*). Следующий горно-лесной пояс образуют смешанные леса, в которых наряду с хвойными породами растут дуб (*Quercus petraea*, *Q. pubescens*), бук, граб, вяз, клен, ясень. В нижнем горно-лесном поясе встречаются небольшие участки широколиственных сообществ из дуба, граба обыкновенного (*Carpinus betulus*) и грабинника (*C. orientalis*). В основаниях склонов в местах вырубленных лесов распространены кустарниковые формации из можжевельника, держидерева, дикой сирени, сливы, шиповника и др.



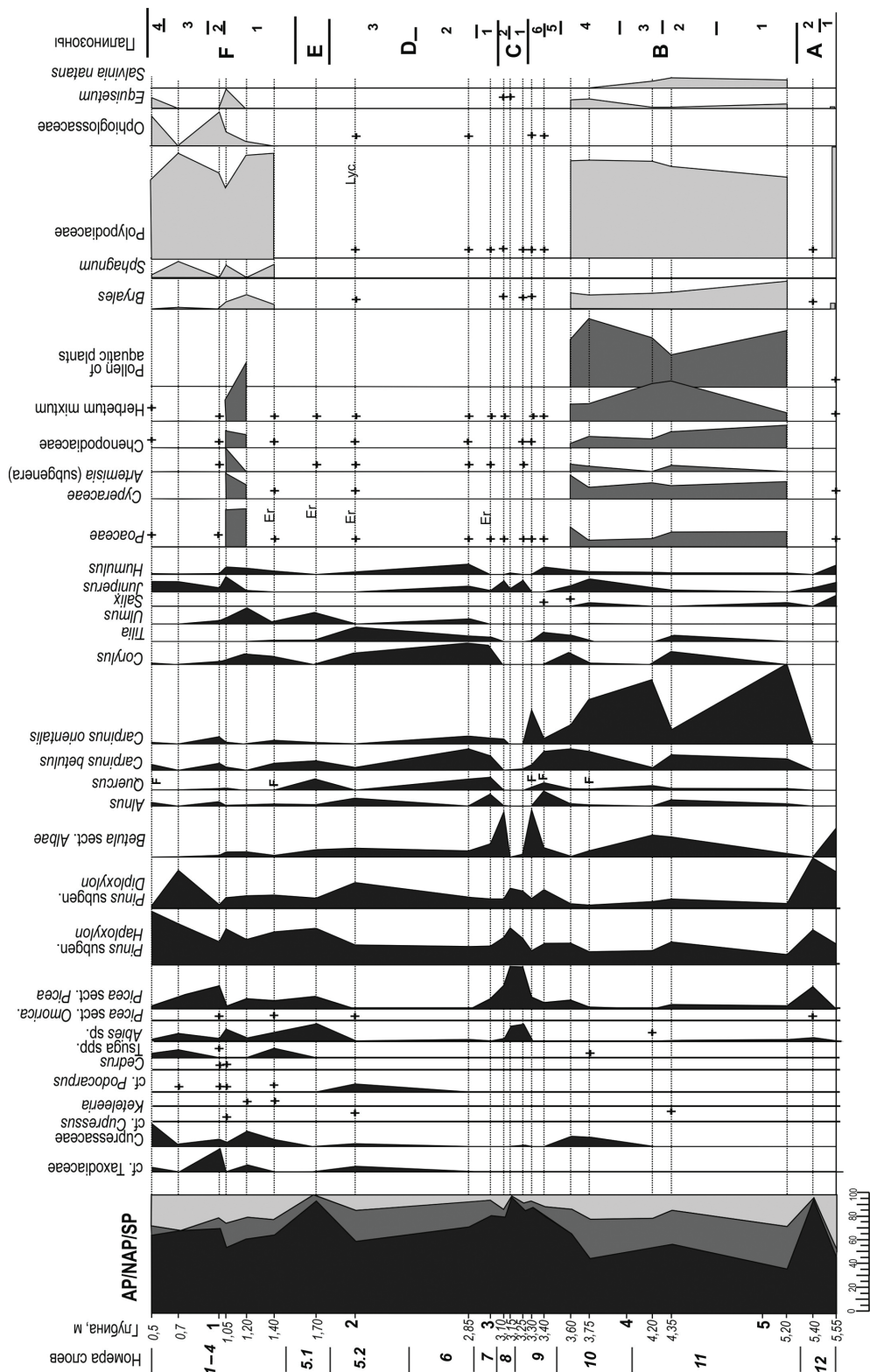


Рис. 3. Спорно-пыльцевая диаграмма плейстоценовых отложений, вскрытых в пещере Трлица:

AP – пыльца деревьев и кустарников; NAP – пыльца трав и кустарников; SP – споры высших споровых растений; (+) – менее 2%; F – *Fagus*; Er – *Ericales* (единичные пыльцевые зерна); Лус. – *Lycodiaceae* (единичные споры). Сводная колонка AP/NAP/SP – содержание пыльцы деревьев и кустарников, трав и кустарников, а также спор показаны в процентах от общей суммы пыльцы и спор. Процентное содержание пыльцы или спор каждого таксона рассчитано по отношению к его содержанию в группе: таксоны деревьев и кустарников в процентах от суммы деревьев и кустарников; таксоны споровых растений в процентах от суммы спор

AP – arboreal pollen (pollen of trees and shrubs); NAP – non-arboreal pollen (pollen of grasses and subshrubs); SP – spores (spores of higher spore plants); (+) – content less than 2%; F – *Fagus*; Er – *Ericales* (single pollen grains); Лус. – *Lycodiaceae* (single spores). Summary column of AP/NAP/SP – content of trees, shrubs, grasses and subshrubs and spores shown as percentages of the pollen and spore sum. The percentage of each taxon was calculated within particular groups: trees and shrubs taxa as a percentage of trees and shrubs sum; grasses and subshrubs taxa as a percentage of grasses and subshrubs sum; spore taxa as a percentage of spore sum

Состав палинофлоры и спорово-пыльцевые спектры изученных отложений свидетельствуют о значительном отличии растительных сообществ плейстоцена от современных фитоценозов естественного растительного покрова окрестностей пещеры Трлица.

По палинологическим данным установлены особенности флоры и растительности трех этапов заключительной части раннего плейстоцена (двух криохронов и разделяющего их термохрона), коррелируемых с 22-й морской изотопной стадией (далее МИС), МИС 21 и МИС 20, а также двух межледниковий и похолодания первой половины среднего плейстоцена, сопоставляемых с МИС 19, МИС 15 и МИС 18 соответственно. Начало холодного этапа, отвечающего МИС 22, датируется, согласно L.E. Lisiecki, M.E. Raymo [2005], ~1,03 млн лет назад (далее л. н.). Возрастные интервалы более молодых реконструированных этапов, согласно составленной А.Н. Молодковым и Н.С. Болиховской [Molodkov, Bolikhovskaya, 2010] климато-хроностратиграфической схеме периодизации и корреляции климатических событий последних 900 тыс. лет, следующие: МИС 21 (~860–815 тыс. л. н.), МИС 20 (~815–787 тыс. л. н.), МИС 19 (~790–760 тыс. л. н.), МИС 18 (~760–710 тыс. л. н.), МИС 15 (~610–535 тыс. л. н.).

В период первого похолодания, сопоставляемого с МИС 22, происходило накопление осадков слоя 12 (ПЗ А1–А2, см. рис. 3). Этот этап характеризовался полным отсутствием в растительном покрове представителей широколиственной дендрофлоры. В начальную фазу (ПЗ А1) верхние части горных склонов занимали хвойные леса из кедровидной сосны (*Pinus* s.g. *Haploxylon*) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) с кустарниковым ярусом из можжевельника и лианами хмеля, ниже на склонах произрастали березово-сосновые леса. В травяном покрове преобладали папоротники (Polypodiaceae). Участки вблизи водотоков и водоемов в днище котловины занимали ивняки. В составе водных и прибрежно-водных травянистых растений заметную роль играли рдест, осоковые, уруть и ежеголовник, реже встречались рогоз и горец земноводный (*Polygonum amphibium*). Во вторую фазу (ПЗ А2) в окрестностях пещеры преобладали сосновые и елово-кедровые с примесью пихты и ели (*Picea* sect. *Omorica*) леса.

Последовавший раннеплейстоценовый межледниковый этап, коррелируемый с МИС 21 и петропавловским межледниковьем Русской равнины, зафиксирован спектрами осадков слоев 9 (его нижней части), 10 и 11 (ПЗ В1–В6). На протяжении этого длительного интергляциала происходили сукцессии в развитии хвойно-широколиственных и широколиственных лесов, в которых доминантами и содоминантами выступали кедровидная сосна

(*Pinus* s.g. *Haploxylon*), кипарисовые (Cupressaceae), граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), граб восточный (*C. orientalis*), дуб, липа (*Tilia cordata*, *T. cf. platyphyllos*) и др. О значительной древности отложений свидетельствует участие в палинофлоре пыльцы *Keteleeria*, реликта мелового и неогенового времени, вечнозеленого хвойного дерева из семейства Pinaceae, произрастающего ныне в юго-восточной Азии.

В полученной палинологической записи выделены шесть палинозон (см. В1–В6 на рис. 3), дающих представление о трансформациях доминировавших лесных сообществ. В первую фазу (ПЗ В1) преобладали грабинники (из *Carpinus orientalis*), более благоприятные местообитания занимали дубово-грабовые леса с незначительной примесью ясеня (*Fraxinus*), ольхи и березы. Во вторую фазу (ПЗ В2) гумидизация климата вызвала значительное сокращение грабинниковых лесов, доминирующую роль приобрели дубово-липово-грабовые леса с подлеском из лещины, при присутствии участков сосново-березовых древостоев на склонах, ольшаников в котловине, елово-кедровых сообществ в верхних частях склонов. Лесные формации третьей фазы были близки лесам первой фазы. В четвертую фазу (слой 10, ПЗ В4) относительное потепление и гумидизация климата привели к появлению кипарисовых, тсуги (единично), бука, липы, хмелеграба (*Ostrya*) и других пород в составе преобладавших хвойно-широколиственных лесов, в которых эдификаторами и соэдификаторами были граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), граб восточный (*Carpinus orientalis*), липа (*Tilia* cf. *cordata*, *Tilia* cf. *platyphyllos*), кедровидная сосна и ель. В хвойно-широколиственных лесах пятой фазы (ПЗ В5) возросла роль липы и дуба. Значительно сократилось участие в древостое грабинника. Заключительная фаза (ПЗ В6) отражает развитие сосново-елово-кедровых, березовых и грабинниковых лесов в условиях относительного похолодания климата в переходный интервал к последующему холодному этапу ледникового ранга. В травяно-кустарничковом покрове всех лесных формаций, произраставших в окрестностях пещеры Трлица, превалировали злаково-разнотравные сообщества, в которых помимо злаков участвовали представители семейств Asteraceae, Lamiaceae, Brassicaceae, Polygonaceae, Campanulaceae, Caryophyllaceae, Iridaceae, Liliaceae, Alliaceae и др. Высокое содержание в отложениях слоев 11 и 10 пыльцы водных и прибрежно-водных растений – водного папоротника сальвинии (*Salvinia natans*), рдеста (*Potamogeton*), осоковых (Cyperaceae), частуховых (Alismataceae), урути (*Myriophyllum*), рогоза (*Typha*) и ежеголовника (*Sparganium*), а также их присутствие в осадках слоя 12 вкупе с зелеными водорослями *Botryococcus*

и *Pediastrum* – несомненное свидетельство седиментации трех этих слоев в субкальвных условиях.

Палинологическая летопись свидетельствует, что перерыв в осадконакоплении, отмеченный при литолого-генетическом анализе на границе слоев 10 и 9, был относительно непродолжительным и зафиксирован в интервале смены четвертой и пятой фаз в развитии растительности рассмотренного выше межледникового.

Климато-фитоценотическая обстановка следующего, сопоставляемого с МИС 20 и покровским похолоданием Русской равнины раннеплейстоценового похолодания (ПЗ С), во время которого накапливались отложения верхней части слоя 9 и слоя 8, отличалась полным отсутствием термофильных таксонов в составе дендрофлоры. В первую реконструированную фазу (ПЗ С1) доминировали пихтово-кедрово-еловые леса с примесью сосны (*Pinus* subgen. *Diploxylon*) и участием в нижнем ярусе можжевельника. Во вторую фазу (ПЗ С2) сократились площади хвойных лесов, из их состава исчезла пихта. На горных склонах преобладали елово-кедровые и сосново-березовые леса. На самых прогреваемых участках нижних частей склонов в составе подлеска березовых древостоев и на опушках произрастал грабник.

Среднеплейстоценовому межледниковому этапу, коррелируемому с МИС 19 и первым (гремьячевским) межледниковьем хрона Брюнес, отвечает период формирования слоев 5.2, 6 и 7 (ПЗ D1-D3), на протяжении которого происходили следующие изменения в составе преобладавших лесных сообществ. При накоплении слоя 7 (ПЗ D1) в условиях умеренно-теплого климата превалировали елово-сосново-широколиственные леса (липово-дубово-грабовые из *Quercus* sp., *Q. cf. ilex*, *Carpinus betulus*, *Tilia cordata*) с лещиной и шелковицей (*Morus*) в подлеске и участками грабниковых, березовых и ольховых древостоев. Весьма разнообразным был состав хвойных пород (*Picea* s. *Picea*, *Pinus* sect. *Cembra*, *P. sect. Strobus*, *P. s.g. Diploxylon*, *P. sylvestris*, *Juniperus*). Следующая фаза в развитии растительности характеризует время формирования слоя 6 (ПЗ D2), когда усилившееся потепление климата вызвало исчезновение ели, значительное сокращение участия сосен (кедровидных и светлыхвойных) и березы в лесных сообществах окрестностей пещеры. Преобладали дубово-грабовые (из *Carpinus betulus*, *Quercus robur*, *Q. petraea*) леса с примесью липы (*Tilia argentea*) и вяза, с нижним ярусом из грабника, лещиной в подлеске и лианами хмеля.

Впоследствии при образовании слоя 5.2 (ПЗ D3) на большей части прилегающей территории в условиях теплого и относительно сухого клима-

та произрастали редкостойные широколиственные и хвойно-широколиственные леса. Ассоциации из широколиственных пород составляли, главным образом, представители ксерофитной горной флоры (*Tilia argentea*, *Carpinus orientalis*, *Celtis*), а также *Carpinus betulus*, *Corylus avellana*, *Alnus glutinosa*. В составе хвойных древостоев преобладали сосны (*Pinus* s.g. *Haploxylon*, *P. s.g. Diploxylon*, *P. sylvestris*), присутствовали Cupressaceae, *Picea s. Omorica*. Не исключено участие хвойных экзотов (cf. *Podocarpus*). О наличии экотопов с увлажненными почвами свидетельствуют находки пыльцы *Parrotia persica*, произрастающей ныне в теплом и влажном субтропическом климате по берегам водоемов, в ущельях на сильно увлажненных почвах.

Последовавшее среднеплейстоценовое похолодание, отвечающее МИС 18, отражено спектром осадков верхней части слоя 5.1 (ПЗ Е), обильно насыщенных в подслое 5.1А десквамированными обломками коренных пород. Ухудшение климатических условий было выражено исчезновением из состава лесов субтропических хвойных и широколиственных тепло-влажнлюбивых пород. Доминировали елово-пихтово-кедровые леса с примесью сосны и березы. В нижних частях склонов заметным было участие грабово-дубово-вязовых сообществ.

Согласно палинологическим данным, перерыв в осадконакоплении изучаемой толщи рыхлых осадков Трлицы, фиксируемый между интервалами формирования слоя 5 и слоев 1–4, был весьма длительным – примерно 100-тысячелетним. Отложения, отвечающие МИС 17 и МИС 16, которым соответствуют семилукское межледниковье и донское оледенение Русской равнины [Molodkov, Bolikhovskaya, 2010], в плейстоценовом разрезе пещеры отсутствуют.

На данном этапе палиностратиграфических исследований с определенной долей уверенности можно утверждать, что основное осадконакопление в пещере (слои 1–4; ПЗ F1-F4) завершилось в межледниковую эпоху среднего плейстоцена, отвечающую ~МИС 15, интергляциалу Noordbergum (Interglacial IV, Voigtstedt, Ferdynandowian) западноевропейской шкалы и мучкапскому межледниковью схемы Европейской России, абсолютный возраст которого определяется кластером ЭПР датировок в интервале ~610–536 тыс. л. н. [Molodkov, Bolikhovskaya, 2010]. Красноцветный почвенно-осадочный комплекс (слои 1–4), формировавшийся при доминировании в исследуемом районе горно-лесных ландшафтов, отличается от рассмотренных выше образований межледникового климата тем, что его характеризует самая богатая по составу таксонов и участию неогеновых реликтов дендропалинофлора. Климато-фитоценотические



сукцессии изученного межледникового интервала среднего плейстоцена отражают четыре фазы трансформации состава господствовавших лесных сообществ. На протяжении первой, второй и четвертой фаз (ПЗ F1, F2 и F4) в теплом и влажном климате господствовали широколиственно-хвойные и хвойно-широколиственные леса с участием субтропических таксонов. Эдификаторами хвойных формаций выступали сосны кедровидные (*Pinus* s.g. *Haploxylon*, *P. s. Cembra*, *P. s. Strobus*), ель, пихта и светлохвойные сосны (*Pinus* s.g. *Diploxylon*, *P. sylvestris*). Значительным было участие реликтов неогеновых хвойных пород (cf. *Podocarpus* sp., *Keteleeria*, *Cedrus*, *Cupressus*, *Tsuga* spp. и, возможно, таксодиевых). Обилие таксонов (*Parrotia persica*, *Fagus*, *Quercus ilex*, *Q. pubescens*, *Carpinus betulus*, *C. orientalis*, *Ostrya* cf. *carpinifolia*, *Corylus avellana*, *Tilia cordata*, *Tilia argentea*, *Celtis*, *Ulmus*, cf. *Pistacia* и др.) было специфической чертой и широколиственной дендрофлоры рассматриваемого межледникового. Доминантами и содоминантами из числа широколиственных пород выступали граб (*Carpinus betulus*), вяз, бук и дуб, а в подлеске *Carpinus orientalis*, *Ostrya* cf. *carpinifolia* и лещина. Присутствие в спектрах пыльцы и влаголюбивых, и засухоустойчивых древесных и кустарниковых форм свидетельствует о разнообразии биотопов. Третья фаза (ПЗ F3) отражает внутримежледниковое похолодание, приведшее к относительно длительной деградации лесных сообществ с господством или участием широколиственных деревьев и господством хвойных пихтово-елово-кедровых лесов с участием тсуги (*Tsuga* cf. *canadensis*), кипариса (*Cupressus*), возможно, подокарпуса (cf. *Podocarpus*), а также сосновых древостоев и можжевельников в кустарниковом ярусе.

Внутримежледниковые (эндотермальные, по Болиховской [2007]) похолодания, выраженные в палинологических записях и получившие флористические и климато-фитоценотические характеристики, установлены в климатической структуре межледниковий хрона Брюнес при детальном палинологическом анализе опорных разрезов плейстоцена различных районов бывшего СССР [Болиховская, 1995]. Палинологические данные разреза Трлица позволяют предполагать присутствие эндотермальных похолоданий и в климаторитмике плейстоценовых интергляциалов Балканского п-ова.

## ВЫВОДЫ

Выполненные исследования показали перспективность пещерных отложений Трлицы в получении палинологической информации для целей климатостратиграфии и реконструкции природных обстановок раннего и среднего плейстоцена Балканского п-ова.

Сопоставление реконструированной летописи межледниковых и ледникового ранга климатических событий раннего и среднего плейстоцена с выделенными в полевых условиях литологическими слоями проанализированных отложений свидетельствует о несовпадении во многих случаях границ между климатостратиграфическими и литостратиграфическими подразделениями.

Впервые для территории Черногории охарактеризованы флоры и климато-фитоценотические сукцессии трех этапов заключительной части раннего плейстоцена, коррелируемых с МИС 22, МИС 21, МИС 20, и трех этапов первой половины среднего плейстоцена, сопоставляемых с МИС 19, МИС 18 и МИС 15.

Установлено, что на протяжении формирования изученных ранне- и среднеплейстоценовых отложений в горных ландшафтах окрестностей пещеры были развиты преимущественно лесные формации, испытывавшие значительные трансформации их состава при смене межледниковых обстановок этапами похолоданий. Во время похолоданий преобладающую роль играли хвойные леса с незначительной примесью широколиственных пород или чистые хвойные древостои. В межледниковья доминировали хвойно-широколиственные и широколиственные леса. Вероятно, флористической спецификой изученных межледниковых этапов было заметное участие в хвойно-широколиственных и других лесных формациях хвойных реликтов (cf. *Podocarpus*, *Keteleeria*, *Cedrus*, *Tsuga* cf. *acullata*, *Tsuga* type *piccolo*).

Палинологические данные свидетельствуют, что в плейстоценовых отложениях пещеры Трлица, как и в других изученных нами ранее плейстоценовых разрезах юга Северной Евразии [Болиховская, 1995, 2007], палинофлоры межледниковья, коррелируемого с мучапским термохроном (~МИС 15), по составу таксонов древесно-кустарниковых растений, разнообразию и участию неогеновых реликтов, были намного богаче, чем флоры предшествующего среднеплейстоценового межледниковья.

**Благодарности.** Данная статья была подготовлена Н.С. Болиховской в рамках исследовательской федеральной темы Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений» (121051100135-0) и В.А. Ульяновым по теме «Эволюция природной среды в кайнозой, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования» (121040100323-5).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болыховская Н.С. Пространственно-временные закономерности развития растительности и климата Северной Евразии в неоплейстоцене // Археология, этнография и антропология Евразии. 2007. Т. 4. № 32. С. 2–28.
- Болыховская Н.С. Эволюция лессово-почвенной формации Северной Евразии. М.: Изд-во МГУ, 1995. 270 с.
- Болыховская Н.С., Деревянко А.П., Шуньков М.В., Маркин С.В., Соболев В.М. Палеогеографические особенности развития плейстоценовой растительности и климата Алтая и Восточного Предкавказья в эпохи обитания древнего человека // Проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена. Вып. 3: сб. науч. ст.: материалы Всероссийской научной конференции «Марковские чтения 2010 года». М.: Географический факультет МГУ, 2011. С. 373–418.
- Болыховская Н.С., Козликин М.Б., Шуньков М.В., Ульянов В.А., Фаустов С.С. Новые данные в палинологии уникального памятника палеолита Денисова пещера на северо-западе Алтая // Бюлл. МОИП. Отдел биологии. 2017. Т. 122. № 4. С. 46–60.
- Вислобокова И.А., Агаджанян А.К. Новые данные о возрасте плейстоценовой фауны местонахождения Трлица (Черногория, Центральные Балканы) и ее корреляция с другими фаунами Европы // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2016. Т. 24. № 2. С. 88–102.
- Деревянко А.П., Шуньков М.В., Булатович Л., Агаджанян А.К., Вислобокова И.А., Ульянов В.А., Аношкин А.А., Меденица И. Исследования в пещере Трлица на севере Черногории // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2011. Т. XVII. С. 44–47.
- Argant J., Dimitrijević V. Pollen analyses of Pleistocene hyaena coprolites from Montenegro and Serbia, *Annales géologiques de la péninsule Balkanique*, 2007, no. 68, p. 63–80.
- Bolikhovskaya N.S., Shunkov M.V. The palynoclimatostratigraphy of the Pleistocene deposits in the Trlica Cave and environmental reconstructions (the Northern Mediterranean, Montenegro), *Proceedings of the IGCP 610 Fourth Plenary Conference and Field Trip "From the Caspian to Mediterranean: Environmental Change and Human Response during the Quaternary"*, Tbilisi, Georgian National Academy of Sciences, 2016, p. 39–42.
- Combourieu-Nebout N., Bertini A., Russo-Ermolli E. et al. Climate changes in the central Mediterranean and Italian vegetation dynamics since the Pliocene, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2015, vol. 218, p. 127–147.
- Joannin S., Quillévère F., Suc J.-P. et al. Early Pleistocene climate changes in the central Mediterranean region as inferred from integrated pollen and planktonic foraminiferal stable isotope analyses, *Quaternary Research*, 2007, vol. 67, p. 264–274.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records, *Paleoceanography*, 2005, vol. 20, PA1003, DOI: 10.1029/2004PA001071.
- Manzi G., Magri D., Palombo M.R. Early – Middle Pleistocene environmental changes and human evolution in the Italian peninsula, *Quaternary Science Reviews (Early Human Evolution in the Western Palaearctic: Ecological Scenarios)*, 2011, vol. 30, iss. 11–12, p. 1420–1438.
- Molodkov A.N., Bolikhovskaya N.S. Climato-chronostratigraphic framework of Pleistocene terrestrial and marine deposits of Northern Eurasia, based on pollen, electron spin resonance, and infrared optically stimulated luminescence analyses, *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2010, vol. 59, p. 49–62.
- Popescu S.-M., Biletekin D., Winter H. et al. Pliocene and Lower Pleistocene vegetation and climate changes at the European scale: Long pollen records and climatostratigraphy, *Quaternary International*, 2010, vol. 219, p. 152–167.

Поступила в редакцию 23.05.2023

После доработки 16.07.2023

Принята к публикации 27.07.2023

## PALYNOCLIMATOSTRATIGRAPHY AND FORMATION CONDITIONS OF PLEISTOCENE DEPOSITS IN THE TRLICA CAVE (MONTENEGRO)

N.S. Bolikhovskaya<sup>1</sup>, V.A. Ul'yanov<sup>2</sup>, M.V. Shun'kov<sup>3</sup><sup>1,2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography<sup>3</sup> Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS, Department of Stone Age Archaeology<sup>1</sup> Research Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography, Leading Scientific Researcher; Department of Geomorphology and Paleogeography, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: natbolikh@mail.ru<sup>2</sup> Department of Geomorphology and Paleogeography, Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: v.a.ulyanov@yandex.ru<sup>3</sup> Head of the Department, D.Sc. in History, corresponding member of the RAS; e-mail: shunkov@archaeology.nsc.ru

The results of palynological analysis allowed climatostratigraphic subdivision of Pleistocene deposits of the Trlica cave, located in the vicinity of Pljevlja town in northern Montenegro. The palynological record confirms significant hiatuses in the sedimentation revealed by the field lithologic-genetic analysis. The changes

of landscape and climatic conditions that occurred during the formation of the studied Pleistocene strata are reconstructed. Specific features of flora and vegetation of three stages of the final part of the Early Pleistocene corresponding to MIS 22, MIS 21, MIS 20, as well as three stages of the first half of the Middle Pleistocene correlated to MIS 19, MIS 18 and MIS 15, have been identified. Throughout the entire period of the Pleistocene deposits in Trlica, the mountain landscapes in the vicinity of the cave were covered mainly by forests, that underwent significant transformations of their composition during the change of interglacial conditions by the stages of cooling. The materials of palynological analysis of the Quaternary sediments of Montenegro are very scarce. Therefore, the spore-pollen data of the Trlica section and the revealed climatic-phytocenotic successions of three interglacial and three relatively cold (near-glacial) stages of the Early and Middle Pleistocene presented in the article are an important contribution to the study of the Pleistocene paleoenvironments of the Balkan Peninsula.

**Keywords:** early-middle pleistocene, spore-pollen analysis, climatic stratigraphy, flora, vegetation

**Acknowledgements.** The paper was prepared under the research theme of the MSU faculty of geography “Paleogeographical reconstructions of natural geosystems and forecast of their future changes” (121051100135-0) (N.S. Bolikhovskaya) and theme “Cenozoic evolution of the environment, the dynamics of the relief, geomorphologic hazards and risks of land-use” (121040100323-5) (V.A. Ul'yanov).

## REFERENCES

- Argant J., Dimitrijević V. Pollen analyses of Pleistocene hyaena coprolites from Montenegro and Serbia, *Annales géologiques de la péninsule Balkanique*, 2007, no. 68, p. 63–80.
- Bolikhovskaya N.S., Derevyanko A.P., Shun'kov M.V. et al. [Paleogeographic features of the development of Pleistocene vegetation and climate of Altai and Eastern Pre-Caucasus in the epochs of ancient man's habitation], *Problemy paleogeografii i stratigrafii plejstocena* [Problems of Pleistocene paleogeography and stratigraphy], vyp. 3, sb. nauch. st.: materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii “Markovskiye chteniya 2010 goda”, Moscow, Geograficheskij fakul'tet MGU, 2011, p. 373–418. (In Russian)
- Bolikhovskaya N.S. *Evolutsiya lossovo-pochvennoj formatsii Severnoj Yevrazii* [The Evolution of Loess-Paleosol Formation of Northern Eurasia], Moscow, Izd-vo MGU, 1995, 270 s. (In Russian)
- Bolikhovskaya N.S. Prostranstvenno-vremennyye zakonmernosti razvitiya rastitel'nosti i klimata Severnoj Evrazii v neoplejstocene [Spatial and temporal regularities in the evolution of vegetation and climate of North Eurasia in the Neopleistocene], *Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia*, 2007, vol. 4, no. 32, p. 2–28. (In Russian and English)
- Bolikhovskaya N.S., Kozlikin M.B., Shun'kov M.V. et al. Novyye dannyye v palinologii unikal'nogo pamyatnika paleolita Denisova peschera na severo-zapade Altaya [New palynological data from the unique Paleolithic site of Denisova Cave in Northwest Altai], *B'ulleten' MOIP, Otdel biologicheskij*, 2017, vol. 122, no. 4, p. 46–60. (In Russian)
- Bolikhovskaya N.S., Shunkov M.V. The palynoclimato-stratigraphy of the Pleistocene deposits in the Trlica Cave and environmental reconstructions (the Northern Mediterranean, Montenegro), IGCP 610 Fourth Plenary Conference and Field Trip “From the Caspian to Mediterranean: Environmental Change and Human Response during the Quaternary”, Tbilisi, Georgian National Academy of Sciences, Proceedings, A. Gilbert, V. Yanko-Hombach (eds.), 2016, p. 39–42.
- Combouieu-Nebout N., Bertini A., Russo-Ermolli E., et al. Climate changes in the central Mediterranean and Italian vegetation dynamics since the Pliocene, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2015, vol. 218, p. 127–147.
- Derevyanko A.P., Shun'kov M.V., Bulatovich L. et al. Issledovaniya v peschere Trlica na severe Chernogorii [Research in the Trlitsa cave in the north of Montenegro], *Problemy arkheologii, etnografii, antropologii Sibiri i sopredel'nykh territorij*, Novosibirsk, Izd-vo IAET SO RAN, 2011, vol. XVII, p. 44–47. (In Russian)
- Joannin S., Quillévéré F., Suc J.-P. et al. Early Pleistocene climate changes in the central Mediterranean region as inferred from integrated pollen and planktonic foraminiferal stable isotope analyses, *Quaternary Research*, 2007, vol. 67, p. 264–274.
- Manzi G., Magri D., Palombo M.R. Early – Middle Pleistocene environmental changes and human evolution in the Italian peninsula, *Quaternary Science Reviews* (Early Human Evolution in the Western Palearctic: Ecological Scenarios), 2011, vol. 30, iss. 11–12, p. 1420–1438.
- Popescu S.-M., Biltekin D., Winter H. et al. Pliocene and Lower Pleistocene vegetation and climate changes at the European scale: Long pollen records and climato-stratigraphy, *Quaternary International*, 2010, vol. 219, p. 152–167.
- Vislobokova I.A., Agadzhanian A.K. Novyye dannyye o vozraste plejstocenovoj fauny mestonakhozhdeniya Trlica (Chernogoriya, Central'nyye Balkany) i yeye korrelyatsiya s drugimi faunami Yevropy [New data on the age of the Pleistocene fauna of the Trlitsa locality (Montenegro, Central Balkans) and its correlation with other faunas of Europe], *Stratigrafiya, Geologicheskaya korrelyatsiya*, 2016, vol. 24, no. 2, p. 88–102. (In Russian)

Received 23.05.2023

Revised 16.07.2023

Accepted 27.07.2023



## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.461.8

### УСЛОВИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В РАЙОНЕ ХРЕБТА КНИПОВИЧА (НОРВЕЖСКОЕ МОРЕ) В ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА МИКРОФОССИЛИЙ

Т.С. Ключевиткина<sup>1</sup>, Е.А. Агафонова<sup>2</sup>, Е.А. Новичкова<sup>3</sup>, Л.А. Лозинская<sup>4</sup>,  
М.П. Чеховская<sup>5</sup>, А.Г. Матуль<sup>6</sup>, М.Д. Кравчишина<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,  
лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена

<sup>2,3,7</sup> Институт океанологии имени П.П. Шишова РАН,

лаборатория физико-геологических исследований имени А.П. Лисицына

<sup>4-6</sup> Институт океанологии имени П.П. Шишова РАН, лаборатория палеоэкологии и биостратиграфии

<sup>1</sup> Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: t.klyuvitkina@mail.ru

<sup>2</sup> Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: agafonovaelizaveta@mail.ru

<sup>3</sup> Вед. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: enovichkova@mail.ru

<sup>4</sup> Мл. науч. сотр.; e-mail: boda11@yandex.ru

<sup>5</sup> Ст. науч. сотр.; e-mail: mjach47@mail.ru

<sup>6</sup> Гл. науч. сотр., зав. лаб., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: amatul@mail.ru

<sup>7</sup> Вед. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: kravchishina@ocean.ru

Выполнена реконструкция климатических событий последних тысячелетий в северо-восточной части Норвежско-Гренландского бассейна по данным микропалеонтологического изучения осадков колонки АМК-6150. Получены новые результаты анализов цист динофлагеллят, диатомовых водорослей, а также бентосных и планктонных фораминифер, позволившие сделать выводы о времени накопления осадков и о природных условиях, господствовавших в то время. Согласно предварительным данным о климатостратиграфии по составу ископаемых микрофоссилий, установлено, что период формирования осадков колонки АМК-6150 не превышает 7000 лет. Состав ассоциаций микрофоссилий и результаты реконструкций указывают на неоднократные смены морских природных условий за это время. На глубине 23–24 см в осадках зафиксировано начало существенного повышения температуры и солёности поверхностных вод за счет возможного усиления влияния Норвежского течения. Согласно видовому и количественному составу ассоциаций диноцист и диатомей, осадки в коротком интервале глубин 14–12 см накапливались в период заметного снижения температуры и усиления влияния арктических водных масс. По данным анализа диноцист методом современных аналогов реконструированы количественные значения летних палеотемператур поверхностных вод и продолжительности ледового покрова. Установлено, что эпизоды похолодания и предполагаемого появления морского сезонного льда были возможны во время накопления осадков на глубинах 29–24, 14–12 и 3–1 см.

**Ключевые слова:** Северная Атлантика, морская геология, палеореконструкции, диатомовые водоросли, цисты динофлагеллят, фораминиферы

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.11

#### ВВЕДЕНИЕ

Норвежско-Гренландский регион играет ключевую роль в формировании климата всего Северного полушария. Через пролив Фрама идет постоянный водообмен: на юг с Восточно-Гренландским течением выносятся холодные полярные водные массы, а на север с Норвежским поступают относительно теплые и солёные воды, которые погружаются под холодные и распространяются в арктические моря вдоль континентального склона

Евразии. В этом регионе проходят Полярный и Арктический фронты, которые в недавнем геологическом прошлом неоднократно меняли свое положение, реагируя на изменения глобального климата. Следовательно, для понимания современных климатических процессов, происходящих в океане, необходим детальный анализ изменений морских природных условий в прошлом. Особенно важно изучение кратковременных климатических событий последних тысячелетий.

Одним из самых точных способов восстановить характер изменений морской среды и климата считаются микропалеонтологические методы. Среди них важную роль играет анализ микроводорослей и в их числе органостенных цист динофлагеллят (диноцист) и диатомовых водорослей, а также планктонных и бентосных фораминифер. С помощью этих микроорганизмов можно реконструировать температуру и соленость морских поверхностных вод, их продуктивность, распространение водных масс и ледовые условия.

В работе представлены новые результаты комплексного микропалеонтологического анализа осадков колонки АМК-6150, полученной в Норвежском море у восточного подножья срединно-океанического хр. Книповича. Колонка получена в глубоководной зоне, в области низких скоростей осадконакопления. Современные же микропалеонтологические исследования позднеплейстоценовых и голоценовых осадков в этом регионе ведутся в основном на шельфах, плато или в районах континентальной окраины, т. е. в зонах относительно быстрой седиментации [Struck, 1997; Andersen et al., 2004; de Vernal et al., 2013a; Van Nieuwenhove et al., 2016]. Глубоководная часть Норвежского моря в настоящее время исследована

в значительно меньшей степени, особенно редко здесь количественные реконструкции палео-гидрологических параметров поверхностных вод.

Данные по распределению микрофоссилий в осадках колонки АМК-6150 позволили реконструировать значения палеотемпературы поверхностных вод и продолжительность ледового покрова, охарактеризовать условия морской среды, существовавшие на разных этапах осадконакопления.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Колонка АМК-6150 (74°46,813' с. ш., 08°26,052' в. д.) получена в северо-восточной части Норвежско-Гренландского бассейна в 75-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2019) с помощью мультикорера Mini Muc K/MT 410 [Клювиткин и др., 2020]. Колонка отобрана в районе восточного подножья хр. Книповича с глубины моря 3013 м (рис. 1). Точка находится на границе между субарктической Северной Атлантикой и Северным Ледовитым океаном, в зоне сезонно мигрирующих фронтов с особенно контрастными проявлениями климатических колебаний. Здесь проходит Западно-Шпицбергенское течение – главная ветвь Норвежского течения, огибающая Шпицберген с запада и севера.

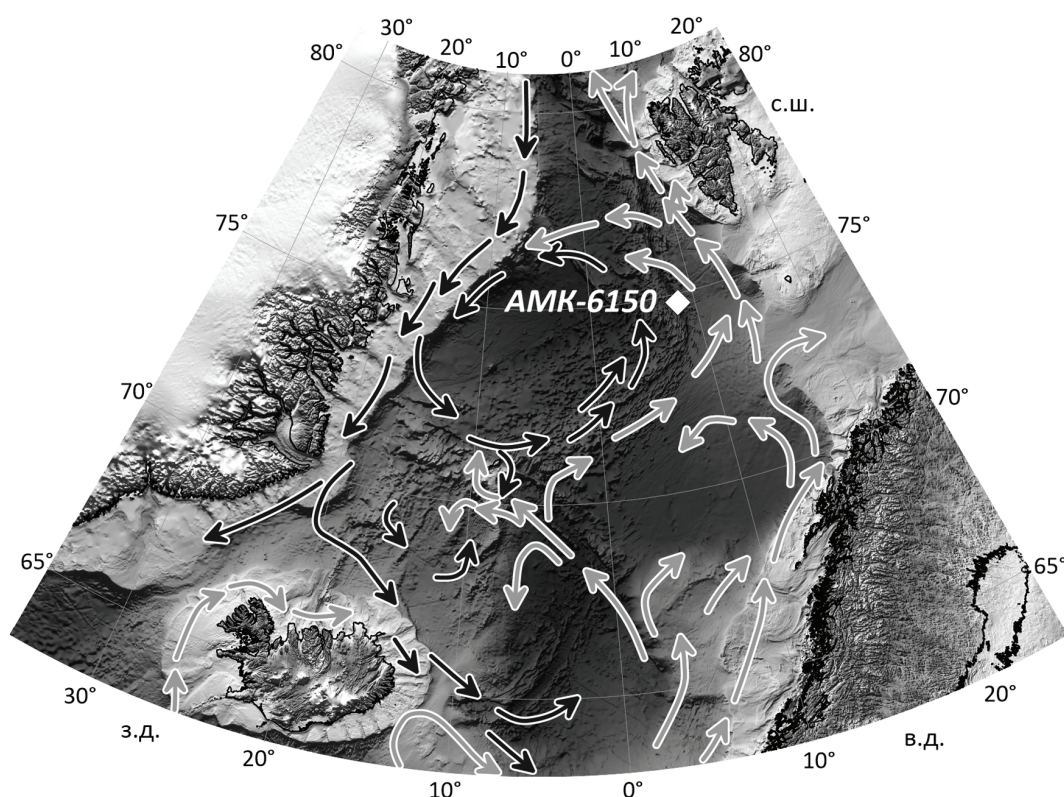


Рис. 1. Местоположение колонки АМК-6150 в Норвежском море. Черными и серыми стрелками показаны холодные и теплые течения соответственно [Blindheim, Rey, 2004]

Fig. 1. Location of AMK-6150 core in the Norwegian Sea. Black and gray arrows show cold and warm currents, respectively [Blindheim, Rey, 2004]

Длина колонки составляет 31 см. В соответствии с литологическим описанием колонки, выполненным на борту судна, установлено, что нижние 31–2 см осадка представлены карбонатным алевроитистым илом темно-коричневого цвета (7.5YR 3/4), в то время как верхние 2 см сложены обводненным биотурбированным алевроитовым илом более светлого оттенка (10YR 3/3), вероятно за счет поверхностного окисления. Увеличение крупности осадка в верхнем слое обусловлено наличием мелких раковин фораминифер. Образцы для изучения микрофоссилий отбирались с интервалом 1 см. Анализы цист динофлагеллят, диатомовых водорослей и фораминифер (планктонных и бентосных) выполнены для 31 образца. Перед химической и механической обработкой все пробы были высушены в лиофильной сушке ALPHA 1-4 LDplus Martin Christ (Германия).

Химическая обработка проб на анализ диноцист осуществлялась по общепринятой палинологической методике [de Vernal, 2010]. Для определения концентраций микроводорослей на начальной стадии в предварительно взвешенный осадок добавлялись таблетки, содержащие фиксированное количество спор *Lycopodium clavatum*. Для растворения карбонатов и кремнесодержащих частиц использовались соляная (HCl) и фтористоводородная (HF) кислоты. Для удаления из образцов пелитовых частиц препараты фильтровались через сито с диаметром пор 7–10 мкм. Исследования ассоциаций микроводорослей проводились под световым микроскопом Neovar 2 и Jenaval (Carl Zeiss) с увеличением в 400 и 1000 раз. В каждом образце было идентифицировано как минимум 300 цист динофлагеллят.

Диноцисты широко распространены в Арктике и Северной Атлантике (динофлагелляты относятся к одним из основных компонентов морского фитопланктона) и, в отличие от многих других микроорганизмов, прекрасно сохраняются в донных осадках. Методической основой применения диноцист в палеоокеанологических исследованиях служит наличие обширной, постоянно пополняемой базы данных, охватывающей весь Мировой океан и, в частности, Северную Атлантику, Арктику и Норвежско-Гренландский бассейн [Rochon et al., 1999; de Vernal et al., 2020]. В базу, содержащую на сегодняшний день 1968 поверхностных образцов, входят данные об ассоциациях диноцист (концентрации и видовой состав), а также основные гидрологические параметры морских поверхностных вод [de Vernal et al., 2020].

Подготовка образцов для диатомового анализа выполнялась по стандартной методике [Диатомовые водоросли СССР, 1974] и заключалась в термической обработке осадка в 10% растворе перекиси водорода ( $H_2O_2$ ) и последующей декантации дистиллированной водой до полного отмучивания

от перекиси и глинистых частиц. Видовые определения диатомей в препаратах осуществлялись с помощью микроскопа Axiostar plus (Carl Zeiss) при увеличении в 1000 раз с использованием иммерсии Immersol 518 N (Carl Zeiss Microscopy GmbH) с показателем преломления 1,518. Количественная оценка состава диатомовых ассоциаций выполнена по методу Баттарби [Battarbee, 1973]. Для этого в составе диатомовых ассоциаций подсчитывалось 300–400 створок (за исключением двух нижних образцов 29–30 и 30–31 см, где диатомеи обнаружены не были).

Возможность использования диатомовых водорослей в качестве индикаторов палеоокеанологических условий базируется на высокой степени изученности ассоциаций диатомей в поверхностных, плейстоценовых и голоценовых отложениях [Andersen et al., 2004; Koç et al., 2013; Oksman et al., 2019] исследуемого района и его ближайших окрестностей. Для целей палеореконструкций все диатомеи в колонке АМК-6150 были разделены на группы по экологическим признакам в соответствии с опубликованными источниками [Pankow, 1990; Жузе, 1962; Диатомовые водоросли СССР, 1974; Horner, 1989; Von Quillfeldt, 1997; Oksman et al., 2019; Полякова и др., 2021].

Для предварительного анализа ассоциаций бентосных и планктонных фораминифер взвешенный осадок фильтровался через сито фракции  $>0,063$  мм (бентос) или  $>0,1$  мм (планктон). В готовых препаратах насчитывали, как правило, 250–350 экземпляров микрофоссилий, определяли таксоны, их относительное содержание (%) и абсолютную концентрацию (экз./г сухого осадка).

По материалам анализа цист динофлагеллят в колонке АМК-6150 реконструированы количественные значения летней температуры поверхностного слоя вод ( $^{\circ}C$ ) и продолжительность ледового покрова (месяцев в году). Палеореконструкции выполнены методом современных аналогов (Modern Analogue Technic; MAT) [Guiot, de Vernal, 2007; de Vernal et al., 2013b, 2020] с использованием пакета программного обеспечения bioindic для R и базы данных диноцист 2020 г. ( $n = 1968$ ) [de Vernal et al., 2020]. Для оценки надежности реконструкций использовалась методика кодов достоверности (reliability codes), учитывающая для каждого образца число подсчитанных в препарате диноцист, сходство с найденными аналогами и количество наиболее близких из них [de Vernal et al., 2013a]. Коды, рассчитанные таким образом, ранжируются от *A* для наиболее надежных оценок до *D* для реконструкций, основанных на малом количестве диноцист и/или неудачных аналогах [Van Nieuwenhove et al., 2016]. Результаты реконструкций для всех образцов колонки АМК-6150 попали в категорию *A*.



## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Анализ фораминифер.** На глубине 31–23 см планктонные фораминиферы отсутствуют, что связано, вероятно, с растворением. В этом интервале наблюдаются относительно низкие численность (около 100 экз./г сух. осадка) и разнообразие (5–7 видов на пробу) бентосных фораминифер. Повышенное содержание в осадках известкового *Oridorsalis umbonatus* и агглютинированных таксонов, в основном представленных видом *Cribrostomoides subglobosus*, указывают на условия с низким потоком органических частиц, холодные обстановки и отсутствие придонных течений [Struck, 1997].

В интервале 23–0 см происходит увеличение общей численности (планктонных до 9000 экз./г и бентосных до 1000 экз./г) и разнообразия (10–20 бентосных видов на пробу) фораминифер, смена бентосного доминанта на *Epistominella exigua* и первое появление малочисленных раковин *Triloculina trihedra*, *Cibicides lobatulus* и *Cassidulina reniforme*. Это, вероятно, указывает на изменения условий осадконакопления, связанные с началом поступления в район значительного количества органического вещества совместно с теплыми водами североатлантического происхождения, которые, вероятно, активно распространяются в глубинном или придонном слое водной толщи [Rasmussen, Thomsen, 2017; Кулешова, Пономаренко, 2018]. Ассоциация планктонных фораминифер представлена видами *Neoglobobulimina pachyderma* sin. (60–100%), *N. pachyderma* dex. (до 6%), *Turborotalita quinqueloba* (до 32%), а также *Globigerina bulloides* и *G. glutinata* (суммарно около 1% в интервале 0–2 см). Такого рода холодноводная ассоциация планктонных фораминифер характерна для голоценовых осадков областей континентальной окраины Баренцева моря (колонка M23258 [Risebrobakken et al., 2011; Sarnthein et al., 2003]).

Таким образом, по данным о составе ассоциаций фораминифер на глубине 23 см в осадках колонки фиксируется резкая смена условий осадконакопления в сторону значительного потепления и усиления притока североатлантических вод.

**Анализ диноцист.** Осадки колонки характеризуются абсолютным преобладанием цист динофлагеллят в составе органических микроводорослей. Все встреченные экземпляры отличались прекрасной сохранностью. Концентрации диноцист варьируют от 13 до 185 тыс./г сухого осадка, их содержание максимально в нижней части колонки, сложенной наиболее тонким материалом, а вверх по разрезу в целом снижается (рис. 2). Также в некоторых пробах отмечены пресноводные зеленые водоросли *Pediastrum* и *Botryococcus*, количество которых не превышает 500 экз./г. Кроме микроводорослей, в препаратах еди-

нично, в основном в верхней части разреза, обнаружены органические остатки скелетов фораминифер.

Всего идентифицировано 20 видов и видовых групп диноцист. Преобладают виды, характерные для послеледниковых и голоценовых осадков Западной Арктики и Северной Атлантики [Zonneveld et al., 2013; Van Nieuwenhove et al., 2016; Brice et al., 2020]. Более 75% в составе ассоциаций во всех пробах занимает *Operculodinium centrocarpum*, типичный вид для северо-восточной части Атлантического океана и Норвежского моря [Rochon et al., 1999; Zonneveld et al., 2013]. Заметную роль в ассоциациях играет также космополитный *Nematosphaeropsis labyrinthus*, в ряде проб его содержание превышает 10%. Абсолютное преобладание *O. centrocarpum* над *N. labyrinthus* – характерная черта среднего и позднего голоцена Норвежско-Гренландского бассейна. Данные по диноцистам из ряда колонок, изученных в этом регионе, показывают, что ранний голоцен характеризовался обратной картиной, т. е. преобладанием *N. labyrinthus* в составе ассоциаций. Смена доминант произошла около 6–7 тыс. лет назад [Van Nieuwenhove et al., 2016], следовательно, возраст осадков колонки AMK-6150, по-видимому, не превышает 7 тыс. лет.

Кроме *O. centrocarpum* и *N. labyrinthus*, в осадках колонки присутствуют *Impagidinium pallidum* (до 8,8%), *Brigantedinium* spp. (до 3,1%), цисты *Pentapharsodinium dalei* (до 1,9%), *Spiniferites elongatus* (до 1,8%), *S. ramosus* (до 1,8%), группа видов *S. mirabilis/hyperacanthus* (до 1,7%), *Bitectatodinium tepikiense* (до 1,7%) и *Impagidinium sphaericum* (до 1,2%). Единично встречены *Ataxodinium choanum*, *Islandinium minutum* subsp. *minutum*, *Lingulodinium machaerophorum*, *Trinovantedinium applanatum*, *Spiniferites belerius* и *S. lazus*. Состав ассоциаций диноцист значительно варьирует по разрезу, указывая на заметные перестройки условий среды, происшедшие в период накопления осадков.

В нижней части колонки, на глубинах 31–24 см, в составе диноцист на фоне общего доминирования *O. centrocarpum* повышено содержание холодноводных *Impagidinium pallidum* (до 4%) и *Spiniferites elongatus* (до 1,1%). Пик содержания этих видов отмечается на глубине 25–26 см. В современных осадках *I. pallidum* и *S. elongatus* широко распространены в высоких широтах. *I. pallidum* достигает 40% в ассоциациях диноцист Гренландского моря [Rochon et al., 1999], также обильно в зоне Полярного фронта [Zonneveld et al., 2013]. *S. elongatus* прекрасно адаптирован к ледовым арктическим условиям, встречается во фьордах Шпицбергена [Grøsfjeld et al., 2009] и повсеместно в Баренцевом море [Zonneveld et al., 2013; de Vernal et al., 2020]. Содержание тепловодных видов в этом интервале минимально. Это может свидетельствовать о том, что осадконакопление шло в условиях низких температур поверхностных вод и близости сезонного морского льда.

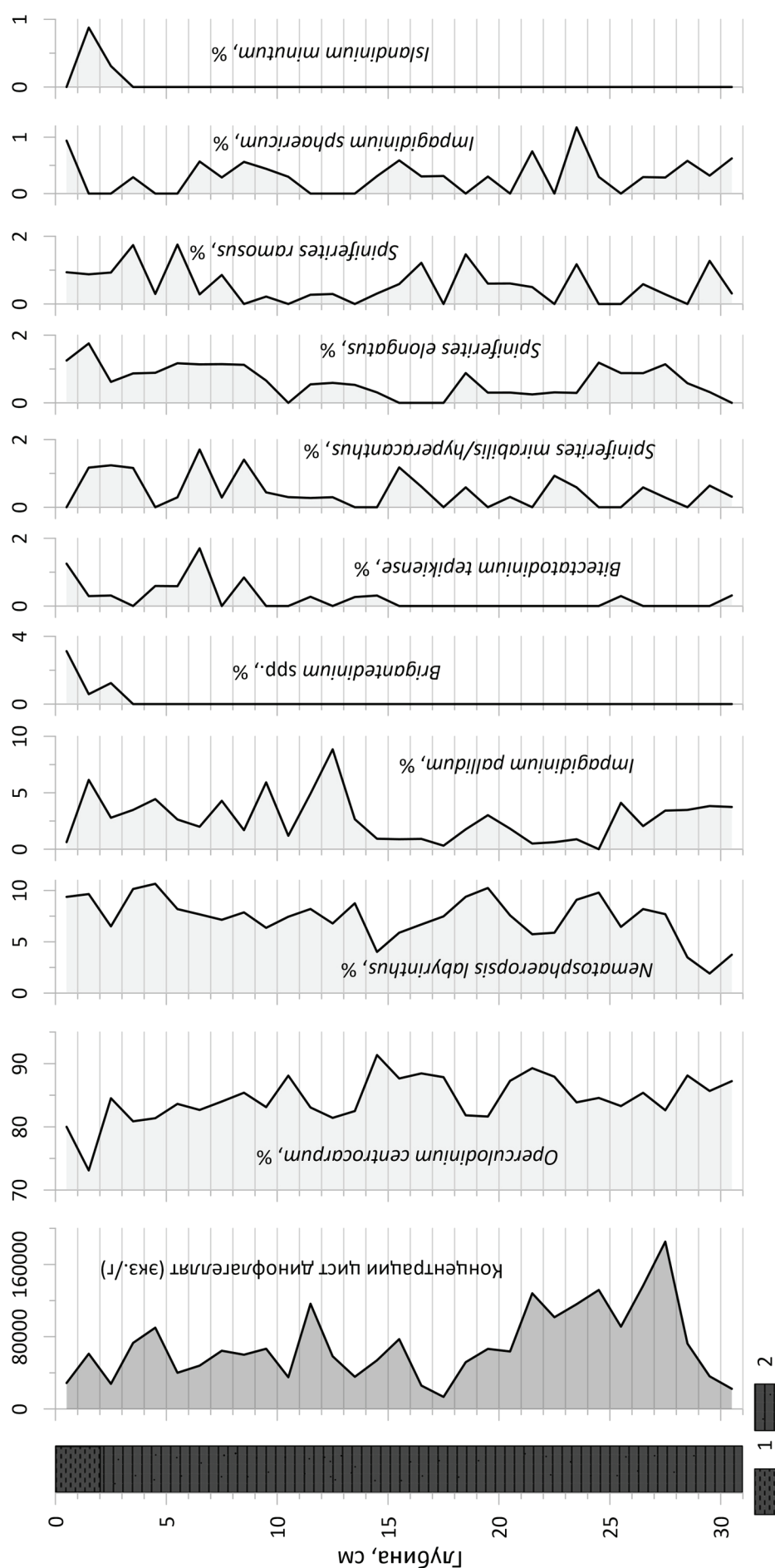


Рис. 2. Литология колонки АМК-6150: 1 – алевроитовый ил; 2 – алевроитистый ил; концентрация и процентные содержания индикаторных видов цист динофлагеллят

Fig. 2. Lithological descriptions (1 – aleurit, 2 – silty pelite), concentration and relative abundances of the main dinocyst taxa in core AMK-6150

Существенная смена условий осадконакопления, судя по ассоциациям диноцист, происходит на глубине 24 см. Она выражается в резком, практически до нуля, снижении содержания *I. pallidum* и *S. elongatus*, при этом в составе ассоциаций возрастает роль *Spiniferites ramosus*, *Impagidinium sphaericum* и группы видов *Spiniferites mirabilis/hyperacanthus*, которые можно считать относительно тепловодными для Норвежско-Гренландского региона. *S. mirabilis/hyperacanthus* широко распространены в умеренных и экваториальных районах Атлантики. *S. ramosus* может присутствовать в морских осадках от субполярных до экваториальных регионов, при этом его распределение ограничено зонами полярных фронтов. Можно предположить, что такой комплекс диноцист формировался в условиях относительного повышения температуры и солености поверхностных вод и, возможно, при некотором усилении влияния Норвежского течения.

Выше по разрезу, в коротком интервале осадков 14–12 см, снова увеличивается число холодноводных видов. Содержание *I. pallidum* резко возрастает до 8,8%, при этом *S. ramosus*, *I. sphaericum* и *S. mirabilis/hyperacanthus* практически исчезают. По-видимому, осадки в этом интервале накапливались во время эпизода похолодания, усиления влияния арктических водных масс.

Выше 12 см находится интервал, в котором происходят резкие, скачкообразные изменения концентраций индикаторных видов, указывающие, предположительно, на короткие и быстрые смены условий осадконакопления.

В самой верхней части колонки опять можно наблюдать смену комплексов цист динофлагеллят: в коротком интервале глубин 1–3 см заметно снижаются их концентрации, а в составе ассоциаций появляются, хоть и в небольших количествах (до 1% либо единично), типичные арктические виды *Islandinium minutum* и *Brigantedinium* spp., не встречающиеся в других частях керна. Вид *I. minutum* – самый распространенный в осадках шельфовых морей Арктики, его содержание часто достигает 97%. В районах, где температура поверхностных вод зимой опускается ниже 0°C, а летом ниже 5°C, *I. minutum* отмечается в количествах свыше 10% [Zonneveld et al., 2013]. *I. minutum* и *Brigantedinium* spp. широко распространены в осадках вдоль восточного побережья Гренландии, а также во фьордах Шпицбергена [Grøsfjeld et al., 2009; Zonneveld et al., 2013]. С удалением к западу от берегов этого архипелага и с увеличением глубины, по мере того как условия поверхности моря меняются от арктических (холодных, с сезонным морским льдом) к атлантическим (относительно

теплым и соленым), ассоциации с доминированием *I. minutum* в поверхностных осадках сменяются ассоциациями с преобладанием *O. centrocarpum* [Salignac et al., 2009]. Кроме того, в данном интервале осадков нашей колонки снова возрастает количество *I. pallidum* (до 6,1%) и *S. elongatus* (до 1,8%), однако содержание *S. ramosus* и *S. mirabilis/hyperacanthus* при этом существенно не меняется. Таким образом, комплекс диноцист в интервале 1–3 см может указывать на возможное похолодание в период формирования осадков, связанное, по-видимому, с влиянием арктических вод в месте взятия колонки.

**Диатомовый анализ.** Суммарные концентрации диатомовых водорослей изменяются от 55 до 693 тыс. ств./г сухого осадка, в целом увеличиваясь снизу вверх (рис. 3). Всего идентифицировано 54 вида диатомей, из них 38 морских неритических и панталасных, 9 морских сублиторальных и 7 пресноводных. Среди неритических и панталасных видов выделены относительно тепловодные *Coscinodiscus radiatus*, *C. asteromphalus*, *Shionodiscus oestrupii*, *Asteromphalus brookei* var. *robustus* и др. и относительно холодноводные *Thalassiosira baltica*, *T. eccentrica*, *Fragilariopsis atlantica* и др. Особое внимание уделялось ледово-морским видам *Attheya septentrionalis* и *Fragilariopsis oceanica*, связанным с морским льдом на протяжении по крайней мере части своего жизненного цикла [Усачев, 1949; Horner, 1989], а также ледово-неритическим видам *Porosira glacialis*, *Thalassiosira nordenskiöldii*, *Bacterosira bathyomphala*, *Rhizosolenia hebetata* f. *hebetata* и др., которые развиваются в фитопланктоне краевой ледовой зоны при температурах, близких 0°C или ниже [Horner, 1989; Von Quillfeldt, 1997; Полякова и др., 2021].

По всему разрезу большая часть ассоциаций диатомовых водорослей представлена относительно тепловодными видами (58–92%), типичными для этой части океана [Oksman et al., 2019], за исключением *Shionodiscus oestrupii*, который наиболее распространен на широтах 40–60° с. ш. и переносится севернее теплыми и солеными водами Северо-Атлантического течения [Oksman et al., 2019].

В нижней части колонки, в интервале 29–24 см (два образца на глубинах 31–29 см не содержали диатомовых водорослей), концентрации диатомей варьируют от 55 до 430 тыс. ств./г, а их ассоциации насчитывают 21 вид. Доля сублиторальных видов, представленных до глубины 7,5 см, исключительно *Paralia sulcata*, в данной части колонки уменьшается снизу вверх с 14,3 до 2,2%. В трех образцах на глубинах 28–29, 27–28 и 24–25 см обнаружены единичные створки вымерших видов диатомей.



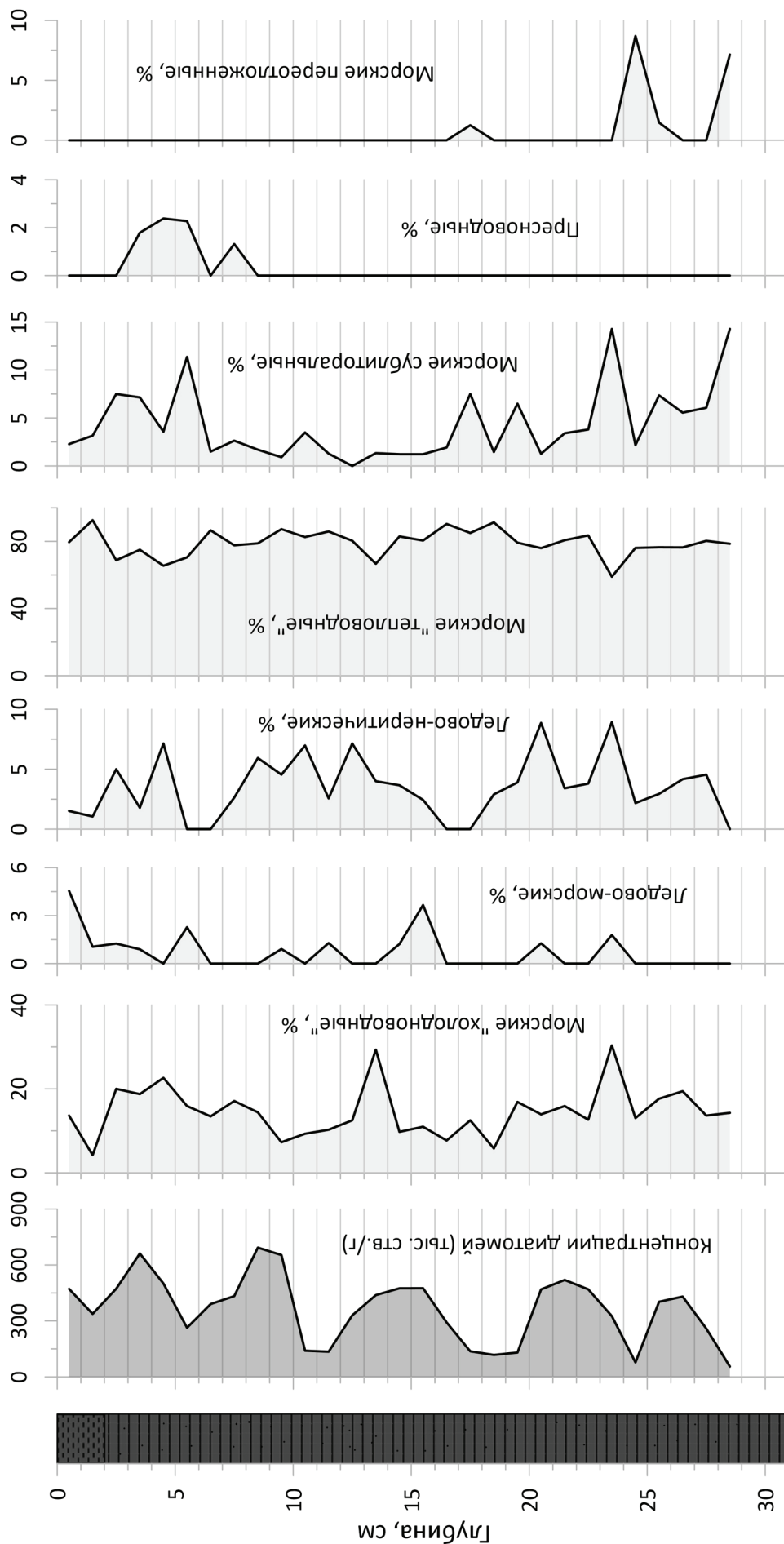


Рис. 3. Концентрации и распределение основных экологических групп диатомовых водорослей в осадках колонки АМК-6150

Fig. 3. Concentrations and distribution of the main ecological groups of diatoms in AMK-6150 core

На глубине 28–29 см они представлены *Thalassiosira undulosa*, характерным для палеогеновых отложений [Атлас микроорганизмов..., 1977], а на 27–28 см – *Hemiaulus polymorphus*. На глубине 24–25 см комплекс переотложенных диатомей состоит из четырех палеогеновых видов: *H. polymorphus*, *Eupyxidicula turris*, *Pyxilla caput-avis* var. *gracilis*, *Creswellia ferox*, здесь же отмечены силикофлагеллаты *Ebriopsis antiqua*. Данные виды, скорее всего, поступали в северо-восточную часть Норвежско-Гренландского бассейна с баренцевоморского шельфа, где ископаемые палеогеновые и неогеновые диатомеи часто встречаются в современных и четвертичных отложениях [Полякова и др., 2021].

Суммарные концентрации диатомей в залегающих выше отложениях сперва растут до глубины 21,5 см и значений 519 тыс. ств./г, затем снижаются до 117 тыс. ств./г, а начиная с 18,5 см вновь увеличиваются до значений 475 тыс. ств./г на глубине 15,5 см. Таксономическое разнообразие диатомовых водорослей в интервале 24–14 см составляет 22 вида. От 23–24 см и выше в отложениях появляются створки ледово-морских видов, содержание ледово-неритических и холодноводных диатомей достигает максимума (8,9 и 30,3% соответственно), а доля сублиторальных видов увеличивается до 14,3%. На глубине 20–21 см наблюдаются локальные пики ледово-морских и ледово-неритических диатомей, при этом несколько снижается (до 75,9%) доля относительно тепловодных видов. Выше по разрезу, до глубины 14–15 см, доля относительно холодноводных и сублиторальных видов последовательно сокращается до 9,8 и 1,2% соответственно, а содержание относительно тепловодных видов повышается до 91,3% на глубине 18–19 см. Появление ледово-морских и увеличение доли ледово-неритических видов диатомей, так же как и смена комплекса диноцист на более тепловодные на глубине 24 см, может свидетельствовать об относительном повышении температуры и солености поверхностных вод за счет усиления влияния Норвежского течения и возможном отступании границы сезонных морских льдов на север. Таяние льда могло способствовать поступлению ледово-морских видов диатомей во время их вегетации в прикромочной зоне льдов в осадочное вещество и дальнейшему их сохранению в отложениях. Это подтверждается недавними исследованиями состава диатомовых ассоциаций осадочного вещества в северо-восточной части Баренцева моря [Агафонов и др., 2023] и осадочного вещества, льда и поверхностных отложений одного из фьордов северо-восточной Гренландии [Limoges et al., 2018]. Результаты этих работ показали, что ледово-морские диатомеи поступают в осадочное вещество и поверхностные осадки во время и по-

сле таяния сезонного морского льда [Limoges et al., 2018; Агафонов и др., 2023].

В интервале глубин 14–12 см наблюдается локальный пик морских относительно холодноводных видов диатомей, доля которых возрастает до 29,3%, и увеличивается до 7,1% число ледово-неритических видов, при этом практически отсутствуют ледово-морские и морские сублиторальные диатомеи. На глубине 13,5 см снижается доля относительно тепловодных видов (до 66,6%), преимущественно за счет уменьшения содержания *Thalassionema nitzschioides*. Такая смена комплексов микроводорослей (как диатомей, так и диноцист) на более холодноводные свидетельствует о накоплении осадков на глубинах 14–12 см в условиях снижения температуры поверхностных вод в районе исследования.

В верхней части колонки суммарные концентрации диатомей имеют два пика – на глубине 8,5 см (до максимальных значений – 693 тыс. ств./г) и 3,5 см (661 тыс. ств./г). В интервале 12–3 см обнаружено 34 вида диатомей. С глубины 8,5 до 3,5 см наблюдается некоторое увеличение доли морских холодноводных видов снизу вверх от 13–14 до 22%. В составе диатомовых ассоциаций на глубине 7,5 см появляются пресноводные виды, представленные планктонными *Aulacoseira islandica*, *A. subarctica*, *Cyclotella meneghiniana* и бентосными видами *Amphora copulata* и *Gomphonema parvulum*. Их появление наряду с небольшим увеличением доли ледово-морских видов может быть связано со смещением к югу положения Полярного фронта, т. е. зоны максимального распространения летнего морского льда, и/или с поступлением айсбергов. Источником пресноводных видов диатомей во льдах, вероятно, служат водотоки архипелага Шпицберген.

Концентрации диатомей в верхней части колонки изменяются незначительно, в целом уменьшаясь снизу вверх до 471 тыс. ств./г. В верхних 3 см увеличивается доля ледово-морских видов и снижается количество ледово-неритических. Пресноводные виды диатомей в верхней части колонки обнаружены не были. Состав микроводорослей свидетельствует об установлении современных условий осадконакопления, для которых, судя по увеличению доли ледово-морских и относительно холодноводных видов диатомовых водорослей (в верхних 1,5 см), в целом характерно усиление влияния арктических водных масс.

**Количественные палеорекострукции.** По материалам анализа цист динофлагеллат в колонке АМК-6150 выполнены первые реконструкции средней летней температуры поверхностных вод и продолжительности ледового покрова (рис. 4). Результаты показывают, что за время накопления осадков колонки температура в данной точке варьировала от

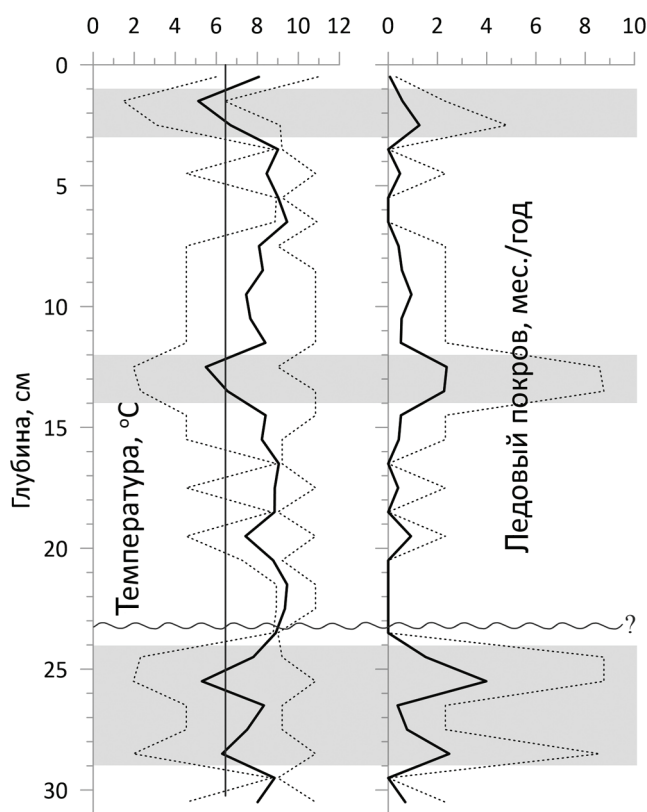


Рис. 4. Реконструированные по цистам динофлагеллят в осадках колонки АМК-6150 средняя летняя температура поверхностных вод и продолжительность ледового покрова.

Сплошная линия на графиках показывает среднее, наиболее вероятное значение; пунктиром ограничен доверительный интервал. Серая вертикальная линия обозначает современную среднюю летнюю температуру поверхностных вод в точке отбора колонки (~6,3°C), волнистой линией отмечена предполагаемая граница смены условий осадконакопления в сторону существенного потепления; фоном выделены интервалы, осадки в которых накапливались, вероятно, в эпохи относительных похолоданий

Fig. 4. The summer sea-surface temperatures (SST) and sea-ice cover duration reconstructed by the dinocyst assemblages in AMK-6150 core.

Solid lines show mean, most probable values and dotted lines delimit the confidence interval. Grey vertical line indicates the current mean summer SST at the core site (~6,3°C). The wavy line marks a supposed threshold for significant warming; the background color indicates the intervals of deposition under relative cooling epochs

5,1 до 9,5°C, оставаясь в среднем выше современного значения (~6,3°C согласно Атласу Мирового океана (World Ocean Atlas)). Тем не менее в нижней части колонки, на глубинах 24–29 см происходит ее заметное снижение, а в образце 25–26 см значение опускалось до 5,3°C. Температуры ниже современ-

ных реконструированы также для интервалов 14–12 см (до 5,5°C) и 3–1 см (до 5,1°C). Этим же глубинам соответствуют интервалы увеличения вероятности появления сезонного льда (учитывая, что в настоящее время точка отбора колонки находится вне зоны распространения льдов). Таким образом, по результатам реконструкций можно заключить, что эпизоды похолодания и предполагаемого появления морского сезонного льда были возможны во время накопления осадков на глубинах 29–24, 14–12 и 3–1 см.

### ВЫВОДЫ

Первые результаты детального микропалеонтологического изучения осадков колонки АМК-6150 позволили сделать выводы о времени их накопления и о природных условиях, господствовавших в то время. Установлено, что:

- согласно предварительным данным о климатостратиграфии по составу ископаемых микрофоссилий период формирования осадков колонки АМК-6150 не превышает 7 тыс. лет;

- появление в осадках на глубине 23–24 см относительно тепловодных цист динофлагеллят и диатомовых водорослей, а также смена ассоциаций бентосных фораминифер указывают на начало существенного повышения температуры и солености поверхностных вод за счет возможного усиления влияния Норвежского течения и, как следствие, отступление границы сезонных морских льдов на север;

- согласно видовому и количественному составу ассоциаций диноцист и диатомей, а именно снижению роли относительно тепловодного североатлантического комплекса и началу доминирования арктических видов, осадки в коротком интервале глубин 14–12 см накапливались в период заметного снижения температуры и усиления влияния арктических водных масс;

- по результатам количественных палеореконовструкций эпизоды похолодания и предполагаемого появления морского сезонного льда были возможны во время накопления осадков на глубинах 29–24, 14–12 и 3–1 см.

Дальнейшие исследования осадков колонки АМК-6150, и в первую очередь радиоуглеродное датирование, позволят уточнить полученные данные, выделить основные палеогеографические события, провести корреляцию с имеющимися данными по другим колонкам Норвежско-Гренландского региона и получить полную, детализированную по времени картину развития природных условий у подножия хр. Книповича.



**Благодарности.** Работа выполнена по гранту РНФ № 21-17-00235 при дополнительной поддержке по теме госзаказов Минобрнауки № FMWE-2021-0006 (отбор проб осадков в экспедициях ИО РАН) и Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова № 121051100135-0 (микроскопные исследования). Авторы благодарны экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш», всем участникам экспедиции, в особенности А.А. Клювиткину и Г.В. Малафееву, за всестороннее содействие и помощь в отборе проб.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас микроорганизмов в донных осадках океанов (диа-  
томеи, радиолярии, силикофлагелляты, кокколиты) /  
под ред. А.П. Жузе. М.: Наука, 1977. 196 с.
- Диаatomовые водоросли СССР (ископаемые и современ-  
ные). Т. 1 / под ред. А.И. Прошкиной-Лавренко. Л.:  
Наука, 1974. 403 с.
- Жузе А.П. Стратиграфические и палеогеографические  
исследования в северо-восточной части Тихого океа-  
на. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 259 с.
- Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Немировская И.А. и др.  
Исследование седиментосистем Европейской Арктики  
в 75-м рейсе научно-исследовательского судна «Акаде-  
мик Мстислав Келдыш» // Океанология. 2020. Т. 60(3).  
С. 485–487. DOI: 10.31857/S003015742003003X.
- Кулешова Л.А., Пономаренко Е.П. О роли видов бен-  
тосных фораминифер *Alabaminella weddellensis* и  
*Epistominella exigua* в палеоокеанологических рекон-  
струкциях // Вестник Балтийского федерального уни-  
верситета им. И. Канта. Сер.: Естественные и меди-  
цинские науки. 2018. № 4. С. 94–104.
- Полякова Е.И., Новичкова Е.А., Агафонова Е.А. Диа-  
томеи и водные палиноморфы в донных осадках  
Баренцева моря: основные закономерности распро-  
странения и использование в палеоокеанологиче-  
ских исследованиях // Система Баренцева моря / под  
ред. акад. А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 64–95.  
DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(8).
- Усачев П.И. Микрофлора полярных льдов // Труды  
ИОАН. 1949. Т. 3. С. 216–359.
- Agafonova E., Novichkova E., Novigatsky A. et al. Diatom  
and dinocyst production, composition and flux from  
the annual cycle sediment trap study in the Barents Sea,  
*Geosciences*, 2023, no. 13(1), DOI: 10.3390/geosciences13010001.
- Andersen C., Koç N., Jennings A., Andrews J. Nonuniform  
response of the major surface currents in the Nordic  
Seas to insolation forcing: Implications for the Holocene  
climate variability, *Paleoceanography*, 2004, no. 19,  
PA2003, DOI: 10.1029/2002PA000873.
- Battarbee R.W. A new method for the estimation of abso-  
lute microfossil numbers, with reference especially to  
diatoms, *Limnology and Oceanology*, 1973, no. 18(4),  
p. 647–653.
- Blindheim J., Rey F. Water-mass formation and distribution  
in the Nordic Seas during the 1990s, *ICES Journal of Ma-  
rine Science*, 2004, no. 61, p. 846–863, DOI: 10.1016/j.  
icesjms.2004.05.003.
- Brice C., de Vernal A., Ivanova E. et al. Palynological evi-  
dence of sea-surface conditions in the Barents Sea off  
northeast Svalbard during the postglacial period, *Quater-  
nary Research*, 2020, no. 108, p. 180–194, DOI: 10.1017/  
qua.2020.2.
- de Vernal A., Henry M., Bilodeau G. Micropaleontological  
Preparation Techniques and Analyses. Notes Prepared for  
Students of Course SCT 8245. Montréal, Département  
des Sciences de la Terre, UQAM, 2010, 32 p.
- de Vernal A., Hillaire-Marcel C., Rochon A. et al. Dinocyst-  
based reconstructions of sea ice cover concentration du-  
ring the Holocene in the Arctic Ocean, the northern North  
Atlantic Ocean and its adjacent seas, *Quaternary Science  
Reviews*, 2013a, no. 79, p. 111–121, DOI: 10.1016/j.  
quascirev.2013.07.006.
- de Vernal A., Radi T., Zaragosi S. et al. Distribution of com-  
mon modern dinoflagellate cyst taxa in surface sediments  
of the Northern Hemisphere in relation to environmental  
parameters: The new  $n = 1968$  database, *Marine Micro-  
paleontology*, 2020, no. 159, 101796, DOI: 10.1016/j.  
marmicro.2019.101796.
- de Vernal A., Rochon A., Fréchette B. et al. Reconstruct-  
ing past sea ice cover of the Northern Hemisphere from  
dinocyst assemblages: Status of the approach, *Quater-  
nary Science Reviews*, 2013b, no. 79, p. 122–134, DOI:  
10.1016/j.quascirev.2013.06.022.
- Grøsfjeld K., Harland R., Howe J. Dinoflagellate cyst as-  
semblages inshore and offshore Svalbard reflecting their  
modern hydrography and climate, *Norwegian Journal of  
Geology*, 2009, no. 89, p. 121–134.
- Guiot J., de Vernal A. Transfer functions: Methods for quan-  
titative paleoceanography based on microfossils, *Proxies  
in Late Cenozoic Paleoceanography*, C. Hillaire-Marcel,  
A. de Vernal (eds.), Amsterdam, Elsevier Science, 2007,  
p. 523–563, DOI: 10.1016/S1572-5480(07)01018-4.
- Horner R. Arctic sea-ice biota, *The Arctic Seas*, Climato-  
logy, Oceanography, Geology, and Biology, Y. Herman  
(ed.), New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1989,  
p. 123–146.
- Koç N., Miettinen A.I., Stickley C. Diatom records. North At-  
lantic and Arctic, *Encyclopedia of Quaternary Science*,  
Netherlands, Amsterdam, Elsevier, 2013, p. 567–576,  
DOI: 10.1016/B978-0-444-53643-3.00227-2.
- Limoges A., Masse G., Weckström K. et al. Spring succession  
and vertical export of diatoms and IP25 in a seasonally  
ice-covered High Arctic fjord, *Frontiers in Earth Science*,  
2018, no. 6(226), DOI: 10.3389/feart.2018.00226.
- Oksman M., Juggins S., Miettinen A., Witkowski A., Weck-  
ström K. The biogeography and ecology of common  
diatom species in the northern North Atlantic, and their  
implications for paleoceanographic reconstructions,  
*Marine Micropaleontology*, 2019, no. 148, p. 1–28,  
DOI: 10.1016/j.marmicro.2019.02.002.
- Pankow H. Ostsee-Algenflora, Gustav Fischer Jena, Verlag,  
1990, 648 p.
- Rasmussen T.L., Thomsen E. Ecology of deep-sea benthic fo-  
raminifera in the North Atlantic during the last glaciation:  
Food or temperature control, *Palaeogeography, Palaeo-  
climatology, Palaeoecology*, 2017, no. 472, p. 15–32.
- Risebrobakken B., Dokken T., Smedsrud L.H. et al. Early  
Holocene temperature variability in the Nordic Seas: The

- role of oceanic heat advection versus changes in orbital forcing, *Paleoceanography*, 2011, no. 26(4), PA4206, DOI: 10.1029/2011PA002117.
- Rochon A., Vernal de A., Turon J.-L. et al. Recent dinoflagellate cysts of the North Atlantic Ocean and adjacent seas in relation to sea-surface parameters, *American Association of Stratigraphic Palynologists Contribution Series*, 1999, no. 35, p. 1–146.
- Sarnthein M., Van Kreveld S., Erlenkeuser H. et al. Centennial-to-millennial-scale periodicities of Holocene climate and sediment injections off the western Barents shelf, 75°N, *Boreas*, 2003, no. 32(3), p. 447–461, DOI: 10.1080/03009480310003351.
- Solignac S., Grøsfeld K., Giraudeau J., de Vernal A. Distribution of modern dinocyst assemblages in the western Barents Sea, *Norwegian Journal of Geology*, 2009, no. 89, p. 109–119.
- Struck U. Paleoeecology of benthic foraminifera in the Norwegian-Greenland Sea during the past 500 ka, *Contribution to the Micropaleontology and Paleocyanography of the Northern North Atlantic: Grzybowski Foundation Special Publication*, 1997, no. 5, p. 51–83.
- Van Nieuwenhove N., Baumann A., Matthiessen J. et al. Sea surface conditions in the southern Nordic Seas during the Holocene based on dinoflagellate cyst assemblages, *The Holocene*, 2016, no. 26(5), p. 722–735, DOI: 10.1177/0959683615618258.
- Von Quillfeldt C.H. Distribution of diatoms in the Northern Water Polynya, Greenland, *Journal of Marine Systems*, 1997, no. 10, p. 211–240.
- Zonneveld K.A.F., Marret F., Versteegh G.J.M. et al. Atlas of modern dinoflagellate cyst distribution based on 2405 data points, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2013, no. 191, p. 1–197, DOI: 10.1016/j.revpalbo.2012.08.003.

Поступила в редакцию 10.02.2023

После доработки 14.06.2023

Принята к публикации 27.07.2023

## HOLOCENE SEDIMENTATION HISTORY OF THE KNIPOVICH RIDGE AREA (THE NORWEGIAN SEA) BASED ON THE ANALYSIS OF MICROFOSSILS

T.S. Klyuvitkina<sup>1</sup>, E.A. Agafonova<sup>2</sup>, E.A. Novichkova<sup>3</sup>, L.A. Lozinskaia<sup>4</sup>,  
M.P. Chekhovskaya<sup>5</sup>, A.G. Matul<sup>6</sup>, M.D. Kravchishina<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography

<sup>2,3,7</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Lisitzin Laboratory of Physical-Geological Studies

<sup>4-6</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Paleoeecology and Biostratigraphy Laboratory

<sup>1</sup> Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: t.klyuvitkina@mail.ru

<sup>2</sup> Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: agafonovaelizaveta@mail.ru

<sup>3</sup> Leading Scientific Researcher, PhD. in Geology and Mineralogy; e-mail: enovichkova@mail.ru

<sup>4</sup> Junior Scientific Researcher; e-mail: boda11@yandex.ru

<sup>5</sup> Senior Scientific Researcher; e-mail: mjach47@mail.ru

<sup>6</sup> Chief Scientific Researcher, Head of the Laboratory, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: amatul@mail.ru

<sup>7</sup> Leading Scientific Researcher, PhD. in Geology and Mineralogy; e-mail: kravchishina@ocean.ru

Climatic events of the last millennia in the northeastern part of the Norwegian-Greenland basin were reconstructed based on micropaleontological studies of sediments from the AMK-6150 core. New results were obtained from analyses of dinoflagellate cysts, diatoms, and benthic and planktonic foraminifers. These results allow us to infer the time of sediment accumulation and the prevailing natural conditions. According to preliminary data on climatostratigraphy based on the composition of microfossils, the period of sediment formation in the AMK-6150 core does not exceed 7 thousand years. The composition of microfossil assemblages and the results of reconstructions indicate repeated changes in marine environmental conditions during this time. Sediments at the depth of 23–24 cm recorded the beginning of a significant growth of temperature and salinity of surface waters due to a possible increase of the Norwegian Current influence. According to the species and quantitative composition of dinocyst and diatom assemblages, sediments in the short depth range of 14–12 cm accumulated during a period of noticeable decrease in temperature and increased influence of Arctic water masses. The analysis of dinocysts by the method of modern analogues allows reconstruction of the quantitative values of summer paleotemperatures of surface waters and the duration of ice cover. It was found that the cooling episodes and probable formation of seasonal sea ice were possible during the accumulation of sediments at the depths of 29–24, 14–12 and 3–1 cm.

**Keywords:** North Atlantic, marine geology, paleoreconstructions, diatoms, dinoflagellate cysts, foraminifers

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-17-00235) and additionally supported by the Ministry of Education and Science No. FMWE-2021-0006 (sampling during the expeditions of the IO RAS) and the Lomonosov Moscow State University No. 121051100135-0 (microscope analysis). The authors are grateful to the crew of the R/V Akademik Mstislav Keldysh, and to all members of the expedition, especially A.A. Klyuvitkin and G.V. Malafeev, for comprehensive assistance and help in sampling.

## REFERENCES

- Agafonova E., Novichkova E., Novigatsky A. et al. Diatom and dinocyst production, composition and flux from the annual cycle sediment trap study in the Barents Sea, *Geosciences*, 2023, vol. 13, no. 1, DOI: 10.3390/geosciences13010001.
- Andersen C., Koç N., Jennings A., Andrews J. Nonuniform response of the major surface currents in the Nordic Seas to insolation forcing: Implications for the Holocene climate variability, *Paleoceanography*, 2004, vol. 19, PA2003, DOI: 10.1029/2002PA000873.
- Atlas mikroorganizmov v donnykh osadkakh okeanov (diatomei, radiolyarii, silikoflagellyaty kokkolity)* [Atlas of microorganisms in bottom sediments of the oceans (diatoms, radiolarians, coccoliths silicoflagellates)], A.P. Jousé (ed.), Moscow, Nauka Publ., 1977, 196 p. (In Russian)
- Battarbee R.W. A new method for the estimation of absolute microfossil numbers, with reference especially to diatoms, *Limnology and Oceanology*, 1973, vol. 18, no. 4, p. 647–653.
- Blindheim J., Rey F. Water-mass formation and distribution in the Nordic Seas during the 1990s, *ICES Journal of Marine Science*, 2004, no. 61, p. 846–863, DOI: 10.1016/j.icesjms.2004.05.003.
- Brice C., de Vernal A., Ivanova E. et al. Palynological evidence of sea-surface conditions in the Barents Sea off northeast Svalbard during the postglacial period, *Quaternary Research*, 2020, no. 108, p. 180–194, DOI: 10.1017/qua.2020.2.
- de Vernal A., Henry M., Bilodeau G. Micropaleontological Preparation Techniques and Analyses. Notes Prepared for Students of Course SCT 8245, Montréal, Département des Sciences de la Terre, UQAM, 2010, 32 p.
- de Vernal A., Hillaire-Marcel C., Rochon A. et al. Dinocyst-based reconstructions of sea ice cover concentration during the Holocene in the Arctic Ocean, the northern North Atlantic Ocean and its adjacent seas, *Quaternary Science Reviews*, 2013a, no. 79, p. 111–121, DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.07.006.
- de Vernal A., Radi T., Zaragosi S. et al. Distribution of common modern dinoflagellate cyst taxa in surface sediments of the Northern Hemisphere in relation to environmental parameters: The new  $n = 1968$  database, *Marine Micropaleontology*, 2020, no. 159, 101796, DOI: 10.1016/j.marmicro.2019.101796.
- de Vernal A., Rochon A., Fréchette B. et al. Reconstructing past sea ice cover of the Northern Hemisphere from dinocyst assemblages: Status of the approach, *Quaternary Science Reviews*, 2013b, no. 79, p. 122–134, DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.06.022.
- Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennye), t. I* [The diatoms of the USSR. Fossil and recent, vol. 1], A.I. Proshkina-Lavrenko (ed.), Leningrad, Nauka Publ., 1974, 403 p. (In Russian)
- Grøsfjeld K., Harland R., Howe J. Dinoflagellate cyst assemblages inshore and offshore Svalbard reflecting their modern hydrography and climate, *Norwegian Journal of Geology*, 2009, no. 89, p. 121–134.
- Guiot J., de Vernal A. Transfer functions: Methods for quantitative paleoceanography based on microfossils, Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography, C. Hillaire-Marcel, A. de Vernal (eds.), Amsterdam, Elsevier Science, 2007, p. 523–563, DOI: 10.1016/S1572-5480(07)01018-4.
- Horner R. Arctic sea-ice biota, *The Arctic Seas, Climatology, Oceanography, Geology and Biology*, Y. Herman (ed.), New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1989, p. 123–146.
- Jousé A.P. *Stratigraficheskie i paleogeograficheskie issledovaniya v severo-vostochnoi chasti Tikhogo okeana* [Stratigraphic and paleogeographic studies in the north-eastern Pacific Ocean], Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962, 259 p. (In Russian)
- Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Nemirowskaya I.A. et al. Studies of sediment systems of the European Arctic during the 75th Cruise of the R/V Akademik Mstislav Keldysh, *Oceanology*, 2020, no. 60(3), p. 421–423.
- Koç N., Miettinen A.I., Stickley C. Diatom records. North Atlantic and Arctic, *Encyclopedia of Quaternary Science*, Netherlands, Amsterdam, Elsevier, 2013, p. 567–576, DOI: 10.1016/B978-0-444-53643-3.00227-2.
- Kuleshova L.A., Ponomarenko E.P. On the benthic foraminifera species of *Alabaminella weddellensis* and *Epistominella exigua* in paleo-oceanologic reconstructions, *Kantian Journal: Natural and medical sciences*, 2018, no. 4, p. 94–104. (In Russian)
- Limoges A., Masse G., Weckström K. et al. Spring succession and vertical export of diatoms and IP25 in a seasonally ice-covered High Arctic fjord, *Frontiers in Earth Science*, 2018, vol. 6, no. 226, DOI: 10.3389/feart.2018.00226.
- Oksman M., Juggins S., Miettinen A., Witkowski A., Weckström K. The biogeography and ecology of common diatom species in the northern North Atlantic, and their implications for paleoceanographic reconstructions, *Marine Micropaleontology*, 2019, vol. 148, p. 1–28, DOI: 10.1016/j.marmicro.2019.02.002.
- Pankow H. Ostsee-Algenflora. Gustav Fischer Jena, Verlag, 1990, 648 p.
- Polyakova Y.I., Novichkova E.A., Agafonova E.A. *Diatomei i vodnye palinomorfy v donnykh osadkakh Barentseva morya: osnovnye zakonomernosti rasprostraneniya i ispol'zovanie v paleoceanologicheskikh issledovaniyakh* [Diatoms and aquatic palynomorphs in the bottom sediments of the Barents Sea: Main patterns of distribution and use in paleoceanological studies], Sistema Barentseva morya [The Barents Sea System], A.P. Lisitzin (ed.), Moscow, GEOS Publ., 2021, p. 64–95, DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(8). (In Russian)



- Rasmussen T.L., Thomsen E. Ecology of deep-sea benthic foraminifera in the North Atlantic during the last glaciation: Food or temperature control, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, no. 472, p. 15–32.
- Risebrobakken B., Dokken T., Smedsrud L.H. et al. Early Holocene temperature variability in the Nordic Seas: The role of oceanic heat advection versus changes in orbital forcing, *Paleoceanography*, 2011, no. 26(4), PA4206, DOI: 10.1029/2011PA002117.
- Rochon A., de Vernal A., Turon J.-L. et al. Recent dinoflagellate cysts of the North Atlantic Ocean and adjacent seas in relation to sea-surface parameters, *American Association of Stratigraphic Palynologists Contribution Series*, 1999, no. 35, p. 1–146.
- Sarnthein M., Van Kreveland S., Erlenkeuser H. et al. Centennial-to-millennial-scale periodicities of Holocene climate and sediment injections off the western Barents shelf, 75°N, *Boreas*, 2003, no. 32(3), p. 447–461, DOI: 10.1080/03009480310003351.
- Solignac S., Grøsfjeld K., Giraudeau J., de Vernal A. Distribution of modern dinocyst assemblages in the western Barents Sea, *Norwegian Journal of Geology*, 2009, no. 89, p. 109–119.
- Struck U. Paleoeecology of benthic foraminifera in the Norwegian-Greenland Sea during the past 500 ka, *Contribution to the Micropaleontology and Paleoceanography of the Northern North Atlantic: Grzybowski Foundation Special Publication*, 1997, no. 5, p. 51–83.
- Usachev P.I. *Mikroflora polyarnykh l'dov* [Microflora of polar ice], Trudy IOAN, vol. 3 [Proc. Oceanol. Inst. USSR Acad. Sci.], 1949, p. 216–259/ (in Russian)
- Van Nieuwenhove N., Baumann A., Matthiessen J. et al. Sea surface conditions in the southern Nordic Seas during the Holocene based on dinoflagellate cyst assemblages, *The Holocene*, 2016, no. 26(5), p. 722–735, DOI: 10.1177/0959683615618258.
- Von Quillfeldt C.H. Distribution of diatoms in the Northern Water Polynya, Greenland, *Journal of Marine Systems*, 1997, vol. 10, p. 211–240.
- Zonneveld K.A.F., Marret F., Versteegh G.J.M. et al. Atlas of modern dinoflagellate cyst distribution based on 2405 data points, *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2013, no. 191, p. 1–197, DOI: 10.1016/j.revpalbo.2012.08.003.

Received 10.02.2023

Revised 14.06.2023

Accepted 27.07.2023

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 550.42

### СОВРЕМЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ФТОРА В ВОДАХ РЕКИ ОБИ

А.В. Савенко<sup>1</sup>, В.С. Савенко<sup>2</sup>, В.А. Ефимов<sup>3</sup>

<sup>1–3</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

<sup>1</sup> *Геологический факультет, кафедра геохимии, ст. науч. сотр.,  
д-р геол.-минерал. наук; e-mail: alla\_savenko@rambler.ru*

<sup>2</sup> *Географический факультет, кафедра гидрологии суши, вед. науч. сотр.,  
д-р геол.-минерал. наук, профессор; e-mail: alla\_savenko@rambler.ru*

<sup>3</sup> *Географический факультет, кафедра гидрологии суши, инженер; e-mail: roxifixat@yandex.ru*

По данным потенциометрических измерений в пробах воды, отобранных в замыкающем створе р. Оби в 2018–2020 гг., определены средние концентрации фтора для разных фаз гидрологического режима: 0,103 мг/л в период зимней межени, 0,079 мг/л в весенне-летнее половодье и 0,095 мг/л в период летне-осенней межени. Современная средневзвешенная концентрация фтора в воде р. Оби (0,086 мг/л) близка к значениям, измеренным в 1954–1956 и 1976–1980 гг. (0,090 и 0,084 мг/л соответственно), что позволяет принять содержание фтора 0,08–0,09 мг/л в качестве естественного фона.

**Ключевые слова:** замыкающий створ, речной сток, фтор, растворенная форма, прямая потенциметрия

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.12

#### ВВЕДЕНИЕ

Одна из фундаментальных научных проблем, связанных с практической реализацией стратегии устойчивого развития, состоит в установлении закономерностей и механизмов процессов миграции химических элементов в биосфере. Знание этих закономерностей необходимо для создания и использования эффективных способов управления состоянием окружающей среды в условиях непрерывного роста интенсивности хозяйственной деятельности.

В биосферном круговороте веществ наиболее изучены биогенные элементы (углерод, кислород, азот, фосфор, сера), которые составляют основную массу вещества живых организмов. Миграция биогенных элементов в наибольшей степени контролируется деятельностью биоты. Этот факт часто абсолютизируется и без достаточных оснований переносится на другие элементы, в биосферной истории которых доминируют абиогенные факторы. В связи с этим представляется чрезвычайно важным расширение круга элементов с детально изученной геохимией в биосферном круговороте веществ и значимым влиянием абиогенных факторов. К таким элементам относится фтор.

Фтор представляет собой биологически активный химический элемент, способный разнонаправлено – как благоприятно, так и негативно – воздействовать на живые организмы (растения, животных,

микроорганизмы) [Габович, Минх, 1979; Hileman, 1990; Авцын и др., 1991; Weinstein, Davison, 2004]. Долгое время биологическая роль фтора связывалась преимущественно с его вхождением в костную ткань, которая подвергается патологическим изменениям при низких и высоких концентрациях этого элемента. Несколько десятилетий назад было обнаружено, что фтор принимает участие и в других важных биохимических реакциях, оказывая, например, ингибирующее воздействие на течение многих ферментативных процессов [Страйер, 1985; Авцын и др., 1991; Agalakova, Gusev, 2011]. Костная ткань при этом выполняет функцию регулятора содержания фторидов в плазме крови и других органах. Эти новые факты позволили более широко подойти к проблеме медико-гигиенической роли фтора и выделить две группы различных заболеваний, обусловленных его низкими или высокими концентрациями: гипо- и гиперфтороз [Авцын и др., 1991].

Содержание фтора в поверхностных и подземных водах является важнейшим медико-экологическим фактором, поскольку в организм человека большая часть фтора поступает с водой. В настоящее время получена обширная информация о содержании фтора в водных объектах питьевого назначения, тогда как общие закономерности миграции фтора в глобальном гидрологическом цикле изуче-

ны слабо. Несмотря на рост интереса к фтору в поверхностных и подземных водах в последние годы [Edmunds, Smedley, 2013; Wen et al., 2013; Malago et al., 2017], сведения о его содержании в мировом речном стоке [Bowen, 1979; Гордеев, 2012] основаны главным образом на эпизодических определениях концентрации этого элемента в некоторых крупных реках мира. Отметим, что в последнем по времени обобщении по речному стоку микроэлементов [Gaillardet et al., 2014] фтор вообще не рассматривался. Исключение составляет работа Г.С. Коновалова и В.И. Кореневой [1985], в которой сток растворенного фтора с территории бывшего СССР был рассчитан для двух периодов (1954–1974 и 1976–1980 гг.) с учетом водного стока по водосборным бассейнам. Фактический материал, положенный в основу этой работы, относится к периоду более чем 40-летней давности, поэтому сведения о современном содержании фтора в водах крупных рек России представляют несомненный интерес. Цель проведенных исследований заключалась в получении новых данных о современном содержании растворенного фтора в воде р. Оби, основанных на определении средних концентраций этого элемента в разные фазы гидрологического режима.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обь берет начало при слиянии рек Бии и Катунь на Алтае, протекает по территории Западной Сибири и впадает в Обскую губу Карского моря. Площадь ее водосбора и бассейна с учетом бессточной площади составляет 2430 и 2953 тыс. км<sup>2</sup> соответственно, а водный сток – 401 км<sup>3</sup>/год [Magritsky et al., 2018]. В 2018–2020 гг. были отобраны пробы воды в замыкающем створе р. Оби у г. Салехарда и в пресноводной части Обской губы (рис.) в разные фазы гидрологического режима: в период зимней межени (24–25 ноября 2018 г.), на пике весенне-летнего половодья (1 июля 2019 г.) и в период летне-осенней межени (21–25 сентября 2018 г. и 11–26 августа 2020 г.). Сведения о средних расходах воды в эти периоды приведены в табл. 1. Пробоотбор в створе гидропоста у г. Салехарда выполняли на трех вертикалях (у правого берега, в фарватере и у левого берега) из

поверхностного, среднего и придонного слоев для повышения точности определения концентраций растворенных веществ по всей площади замыкающего створа [Chalov et al., 2020]. Параллельно измеряли расходы воды с помощью ADCP Росгидромета.

Концентрацию растворенного фтора определяли методом прямой потенциометрии [Савенко, 1986] с использованием фторидного ионоселективного электрода и хлорсеребряного электрода сравнения в насыщенном растворе KCl. Калибровку измерительной электрохимической цепи проводили по стандартным растворам NaF с концентрациями фторид-ионов 0,05, 0,10, 0,20 и 0,50 мг/л. Для поддержания постоянной ионной силы и оптимального значения pH в стандартные растворы и пробы добавляли ацетатный буферный раствор с pH = 6,3 и концентрацией KCl 2 М в объемном соотношении 1:10 (1 мл буферного раствора на 10 мл пробы). Чувствительность метода составила 0,02 мг F/л. Погрешность измерений не превышала 1%.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений приведены в табл. 2. Средние концентрации фтора для разных фаз гидрологического режима составили: 0,103 мг/л в период зимней межени, 0,079 мг/л в весенне-летнее половодье и 0,095 мг/л в период летне-осенней межени. Близость среднеарифметических и среднегеометрических значений свидетельствует о соответствии распределения концентраций фтора нормальному закону. Согласно расчетам [Magritsky et al., 2018], водный сток р. Оби в зимнюю межень, весенне-летнее половодье и летне-осеннюю межень составил 18,3, 65,8 и 15,9% общего годового стока (401 км<sup>3</sup>). Основываясь на этих данных и на результатах наших измерений, получим средневзвешенную концентрацию фтора в воде р. Оби, равную 0,086 мг/л. Это значение близко к оценкам среднего содержания растворенного фтора в мировом речном стоке, приводимым в сводках [Bowen, 1979; Гордеев, 2012], – 0,09–0,10 мг/л. С учетом распределения водного стока по фазам гидрологического режима вынос фтора в океан водами р. Оби составляет 34,5 тыс. т/год.

Таблица 1

**Средние расходы воды р. Оби на гидропосту Росгидромета у г. Салехарда во время полевых наблюдений 2018–2020 гг. [McClelland et al., 2023]**

| Фаза гидрологического режима | Период полевых наблюдений | Средний расход за период, м <sup>3</sup> /с |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|
| Зимняя межень                | 24–25.11.2018             | 8710                                        |
| Весенне-летнее половодье     | 01.07.2019                | 31 500                                      |
| Летне-осенняя межень         | 21–25.09.2018             | 11 000                                      |
| То же                        | 11–26.08.2020             | 18 700                                      |



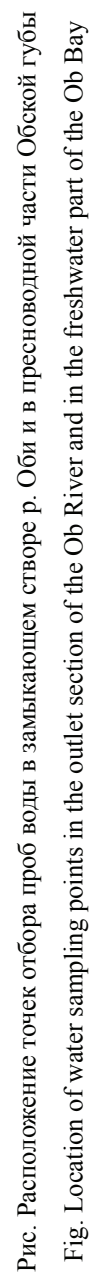


Таблица 2

**Концентрации растворенного фтора в водах р. Оби в 2018–2020 гг. в разные фазы гидрологического режима**

| Описание точек отбора проб                                                 | Номера точек согласно рисунку | Концентрация фтора, мг/л |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Зимняя межень, замыкающий створ у г. Салехарда, 24–25.11.2018              |                               |                          |
| Вертикаль у правого берега, 0,5 м                                          | II-17                         | 0,115                    |
| Там же, 2,0 м                                                              | II-18                         | 0,105                    |
| Там же, 3,5 м (у дна)                                                      | II-19                         | 0,101                    |
| Вертикаль на стрежне, 0,5 м                                                | II-20                         | 0,107                    |
| Там же, 9,0 м                                                              | II-21                         | 0,101                    |
| Там же, 16,0 м (у дна)                                                     | II-22                         | 0,097                    |
| Вертикаль у левого берега, 0,5 м                                           | II-23                         | 0,097                    |
| <i>Среднее для зимней межени</i>                                           |                               | <i>0,103±0,006</i>       |
| Пик весенне-летнего половодья, замыкающий створ у г. Салехарда, 01.07.2019 |                               |                          |
| Вертикаль у правого берега, 0,5 м                                          | III-24                        | 0,091                    |
| Там же, 9,0 м                                                              | III-25                        | 0,089                    |
| Там же, 17,0 м (у дна)                                                     | III-26                        | 0,086                    |
| Вертикаль на стрежне, 0,5 м                                                | III-27                        | 0,071                    |
| Там же, 10,5 м                                                             | III-28                        | 0,081                    |
| Там же, 21,0 м (у дна)                                                     | III-29                        | 0,076                    |
| Вертикаль у левого берега, 0,5 м                                           | III-30                        | 0,070                    |
| Там же, 4,0 м                                                              | III-31                        | 0,072                    |
| Там же, 8,0 м (у дна)                                                      | III-32                        | 0,076                    |
| <i>Среднее для весенне-летнего половодья</i>                               |                               | <i>0,079±0,008</i>       |
| Летне-осенняя межень, замыкающий створ у г. Салехарда, 21.09.2018          |                               |                          |
| Вертикаль у правого берега, 0,5 м                                          | I-1                           | 0,092                    |
| Там же, 2,0 м                                                              | I-2                           | 0,094                    |
| Там же, 4,5 м (у дна)                                                      | I-3                           | 0,093                    |
| Вертикаль на стрежне, 0,5 м                                                | I-4                           | 0,114                    |
| Там же, 8,0 м                                                              | I-5                           | 0,094                    |
| Там же, 15,0 м (у дна)                                                     | I-6                           | 0,092                    |
| Вертикаль у левого берега, 0,5 м                                           | I-7                           | 0,080                    |
| Там же, 4,0 м (у дна)                                                      | I-8                           | 0,080                    |
| То же, замыкающий створ у г. Салехарда, 25.09.2018                         |                               |                          |
| Вертикаль у правого берега, 0,5 м                                          | I-9                           | 0,108                    |
| Там же, 2,0 м                                                              | I-10                          | 0,099                    |
| Там же, 4,5 м (у дна)                                                      | I-11                          | 0,096                    |
| Вертикаль на стрежне, 0,5 м                                                | I-12                          | 0,110                    |
| Там же, 10,0 м                                                             | I-13                          | 0,100                    |
| Там же, 16,0 м (у дна)                                                     | I-14                          | 0,100                    |
| Вертикаль у левого берега, 0,5 м                                           | I-15                          | 0,088                    |
| Там же, 4,5 м (у дна)                                                      | I-16                          | 0,089                    |
| То же, пресноводная часть Обской губы, 11–26.08.2020                       |                               |                          |
| 0,5 м, 11.08.2020                                                          | IV-33                         | 0,115                    |
| То же                                                                      | IV-34                         | 0,111                    |
| То же                                                                      | IV-35                         | 0,110                    |
| То же, 12.08.2020                                                          | IV-36                         | 0,089                    |
| То же                                                                      | IV-37                         | 0,088                    |
| То же, 13.08.2020                                                          | IV-38                         | 0,061                    |
| То же                                                                      | IV-39                         | 0,096                    |
| То же, 22.08.2020                                                          | IV-40                         | 0,084                    |
| То же, 24.08.2020                                                          | IV-41                         | 0,080                    |
| То же                                                                      | IV-42                         | 0,100                    |
| То же, 25.08.2020                                                          | IV-43                         | 0,100                    |
| То же                                                                      | IV-44                         | 0,106                    |
| То же                                                                      | IV-45                         | 0,102                    |
| То же, 26.08.2020                                                          | IV-46                         | 0,109                    |
| <i>Среднее для летне-осенней межени</i>                                    |                               | <i>0,095±0,012</i>       |

В XXI в. антропогенное воздействие на окружающую среду достигло планетарных масштабов и привело к ощутимым изменениям химического состава поверхностных и подземных вод. Эти изменения достоверно зафиксированы на локальном и региональном уровнях и в некоторых случаях, возможно, имеют глобальный характер. Согласно оценке [Klee, Graedel, 2004], природные факторы ответственны за мобилизацию в окружающей среде только 30% фтора, тогда как на долю антропогенных факторов приходится около 70%. Поэтому можно предположить, что с течением времени концентрация фтора в речных водах будет увеличиваться в соответствии с усилением антропогенного воздействия на окружающую среду. Приведенные в табл. 3 данные о содержании фтора в водах р. Оби показывают, что его современная концентрация практически не отличается от концентраций, измеренных в 1954–1956 и 1976–1980 гг. Вместе с тем средняя концентрация фтора для периода 1954–1974 гг. примерно в 2 раза превышала таковую в 1976–1980 гг. при небольшом различии объемов водного стока. Сходная ситуация наблюдалась для многих других рек, находящихся в разных климатических зонах и подверженных ан-

тропогенным воздействиям разной интенсивности [Коновалов, Коренева, 1985]. Оценка среднего содержания фтора для периода 1954–1974 гг. включает данные за 1973 и 1974 гг., когда его концентрации достигали наиболее высоких значений (0,19 и 0,40 мг F/л). Причина временного повышения концентраций фтора до величин, близко соответствующих характерным для грунтовых вод, не ясна. Вероятно, аномально высокие концентрации фтора, которые были получены в 1973–1974 гг., связаны с повышенным содержанием взвешенных веществ. Наиболее тонкая фракция взвесей при фильтрации может не полностью отделяться от раствора, а при использовании колориметрических методов, применявшихся до разработки фторидного ионоселективного электрода, присутствие взвешенных веществ могло приводить к завышенным результатам [Савенко, Шмидеберг, 1977].

Таким образом, современная концентрация растворенного фтора в воде р. Оби, равная 0,08–0,09 мг/л, по-видимому, соответствует естественному фону, и антропогенные изменения окружающей среды пока не привели к существенному загрязнению речной воды этим элементом.

Таблица 3

**Средние концентрации растворенного фтора в водах р. Оби  
в разные временные интервалы с 1954 по 2020 г.**

| Период наблюдений, годы | Концентрация фтора, мг/л | Ссылка                      |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1954–1956               | 0,090                    | [Коновалов, 1959]           |
| 1973                    | 0,192                    | [Коновалов, Коренева, 1979] |
| 1974                    | 0,404                    | Там же                      |
| 1954–1974               | 0,170                    | [Коновалов, Коренева, 1985] |
| 1976–1980               | 0,084                    | Там же                      |
| 2018–2020               | 0,086                    | Данная работа               |

### ВЫВОДЫ

Измеренное в 2018–2020 гг. содержание растворенного фтора в воде р. Оби минимально на пике весенне-летнего половодья (0,079 мг/л) и увеличивается в периоды летне-осенней и зимней межени до 0,095 и 0,103 мг/л. Современная сред-

невзвешенная концентрация растворенного фтора равна 0,086 мг/л, что близко к концентрациям фтора в воде р. Оби в 1954–1956 и 1976–1980 гг., равным 0,090 и 0,084 мг/л. Можно допустить, что эта концентрация соответствует естественному фоновому уровню.

**Благодарности.** Авторы выражают признательность Д.В. Магрицкому, А.Ю. Тришину, В.А. Иванову и К.С. Григоренко за отбор проб воды во время полевых работ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авцын А.П., Жаворонков А.А., Руш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека (этиология, классификация, органопатология). М.: Медицина, 1991. 496 с.

Габович Р.Д., Минх А.А. Гигиенические проблемы фторирования питьевой воды. М.: Медицина, 1979. 200 с.



- Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. М., 2012. 452 с.
- Коновалов Г.С. Вынос микроэлементов главнейшими реками СССР // Докл. АН СССР. 1959. Т. 129. № 4. С. 912–915.
- Коновалов Г.С., Коренева В.И. Вынос микроэлементов речным стоком с территории СССР в моря в современный период // Гидрохимические материалы. 1979. Т. 75. С. 11–21.
- Коновалов Г.С., Коренева В.И. Изменение стока растворенных веществ с речных водосборов в моря в условиях антропогенного воздействия: тр. II Международного симпозиума «Геохимия природных вод» (Ростов-на-Дону, 17–22 мая 1982 г.). Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. С. 46–54.
- Савенко В.С. Введение в ионометрию природных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 77 с.
- Савенко В.С., Шмидеберг Н.А. К методике определения малых концентраций фтора в природных водах // Гидрохимические материалы. 1977. Т. 65. С. 96–101.
- Страйер Л. Биохимия. Т. 2. М.: Мир, 1985. 308 с.
- Agalakova N.I., Gusev G.P. Effect of inorganic fluoride on living organisms of different phylogenetic level, *J. Evolut. Biochem. Physiol.*, 2011, vol. 47, no. 5, p. 393–406.
- Bowen H.J.M. Environmental Chemistry of the Elements, London, Academic Press, 1979, 333 p.
- Chalov S., Moreido V., Sharapova E., Efimova L., Efimov V., Lychagin M., Kasimov N. Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga River – main tributary of the lake Baikal, *Water*, 2020, vol. 12, no. 5, p. 1–17.
- Edmunds W.M., Smedley P.L. Fluoride in natural waters, *Essentials of Medical Geology*, Springer, 2013, p. 311–336.
- Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in river waters, *Treatise on Geochemistry* (Second Edition), Amsterdam et al., Elsevier, 2014, vol. 7, p. 195–235.
- Hileman B. Fluoride/cancer: Equivocal link in rats endorsed, *Chem. Eng. News.*, 1990, vol. 68, no. 19, p. 4.
- Klee R.J., Graedel T.E. Elemental cycles: A status report on human or natural dominance, *Ann. Rev. Environ. Res.*, 2004, vol. 29, no. 1, p. 69–107.
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, p. 177–194.
- Malago J., Makoba E., Muzuka A. Fluoride levels in surface and groundwater in Africa: A review, *Amer. J. Water Sci. Eng.*, 2017, vol. 3, no. 1, p. 1–17.
- Weinstein L.H., Davison A.W. Fluorides in the Environment: Effects on Plants and Animals, Wallingford, Cambridge, CABI Publ., 2004, 296 p.
- Wen D., Zhang F., Zhang E. et al. Arsenic, fluoride and iodine in groundwater of China, *J. Geochem. Explor.*, 2013, vol. 135, no. 10, p. 1–21.

#### Электронный ресурс

McClelland J.W., Tank S.E., Spencer R.G.M., Shiklomanov A.I., Zolkos S., Holmes R.M. Arctic Great Rivers Observatory, Discharge Dataset, 2023, Version 20230406, URL: <https://arcticgreatrivers.org/data> (дата обращения 12.04.2023).

Поступила в редакцию 18.04.2023

После доработки 03.05.2023

Принята к публикации 27.07.2023

## PRESENT-DAY FLUORINE CONCENTRATION IN THE OB RIVER WATER

A.V. Savenko<sup>1</sup>, V.S. Savenko<sup>2</sup>, V.A. Efimov<sup>3</sup>

<sup>1–3</sup> Lomonosov Moscow state university

<sup>1</sup> Faculty of Geology, Department of Geochemistry, Senior Scientific Researcher, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: [alla\\_savenko@rambler.ru](mailto:alla_savenko@rambler.ru)

<sup>2</sup> Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Leading Scientific Researcher, professor, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: [alla\\_savenko@rambler.ru](mailto:alla_savenko@rambler.ru)

<sup>3</sup> Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, engineer; e-mail: [roxifixat@yandex.ru](mailto:roxifixat@yandex.ru)

Based on the potentiometric measurements average fluorine concentrations for different phases of the hydrological regime were determined in water samples taken in 2018–2020 in the outlet of the Ob River: 0,103 mg/L in the winter low-water period, 0,079 mg/L in the spring–summer flood, and 0,095 mg/L in the summer–autumn low-water period. The present-day weighted average concentration of fluorine in the Ob River water (0,086 mg/L) closely corresponds to the values measured in 1954–1956 and 1976–1980 (0,090 and 0,084 mg/L, respectively), therefore the fluorine content of 0,08–0,09 mg/L could be taken as a natural background.

**Keywords:** outlet section, river runoff, fluorine, dissolved form, direct potentiometry

**Acknowledgements.** The authors are grateful to D.V. Magritsky, A.Yu. Trishin, V.A. Ivanov, and K.S. Grigorenko for taking water samples during the field work.

## REFERENCES

- Agalakova N.I., Gusev G.P. Effect of inorganic fluoride on living organisms of different phylogenetic level, *J. Evolut. Biochem. Physiol.*, 2011, vol. 47, no. 5, p. 393–406.
- Avtsyn A.P., Zhavoronkov A.A., Rish M.A., Storchkova L.S. *Mikroelementozy cheloveka (etiologiya, klassifikatsiya, organopatologiya)* [Human microelementoses (etiology, classification, organopathology)], Moscow, Meditsina Publ., 1991, 496 p. (In Russian)
- Bowen H.J.M. *Environmental Chemistry of the Elements*, London, Academic Press, 1979, 333 p.
- Chalov S., Moreido V., Sharapova E., Efimova L., Efimov V., Lychagin M., Kasimov N. Hydrodynamic controls of particulate metals partitioning along the lower Selenga River – main tributary of the lake Baikal, *Water*, 2020, vol. 12, no. 5, p. 1–17.
- Edmunds W.M., Smedley P.L. Fluoride in natural waters, *Essentials of Medical Geology*, Dordrecht et al., Springer, 2013, p. 311–336.
- Gabovich R.D., Minkh A.A. *Gigienicheskie problemy florirovaniya pit'voi vody* [Hygienic problems of drinking water fluoridation], Moscow, Meditsina Publ., 1979, 200 p. (In Russian)
- Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in river waters, *Treatise on Geochemistry* (Second Edition), Amsterdam et al., Elsevier, 2014, vol. 7, p. 195–235.
- Gordeev V.V. *Geokhimiya sistemy reka – more* [Geochemistry of the river – sea system], Moscow, 2012, 452 p. (In Russian)
- Hileman B. Fluoride/cancer: Equivocal link in rats endorsed, *Chem. Eng. News.*, 1990, vol. 68, no. 19, p. 4.
- Klee R.J., Graedel T.E. Elemental cycles: A status report on human or natural dominance, *Ann. Rev. Environ. Res.*, 2004, vol. 29, no. 1, p. 69–107.
- Kononov G.S. Vynos mikroelementov glavneishimi rekami SSSR [The efflux of trace elements by the main rivers of the USSR], *Doklady AN SSSR*, 1959, vol. 129, no. 4, p. 912–915. (In Russian)
- Kononov G.S., Koreneva V.I. [Changes in the runoff of dissolved substances from river catchments to the seas under anthropogenic impact], *tr. II Mezhdunarodnogo Simpoz. "Geokhimiya prirodnikh vod"* [Proc. of the II Int. Sympos. "Geochemistry of Natural Waters"], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, p. 46–54. (In Russian)
- Kononov G.S., Koreneva V.I. Vynos mikroelementov rechnym stokom s territorii SSSR v morya v sovremennyi period [The efflux of trace elements by river runoff from territory of the USSR to seas in the modern period], *Gidrokhimicheskiye Materialy*, 1979, vol. 75, p. 11–21. (In Russian)
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, p. 177–194.
- Malago J., Makoba E., Muzuka A. Fluoride levels in surface and groundwater in Africa: A review, *Amer. J. Water Sci. Eng.*, 2017, vol. 3, no. 1, p. 1–17.
- Savenko V.S. *Vvedeniye v ionometriyu prirodnikh vod* [Introduction to the ionometry of natural waters], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986, 77 p. (In Russian)
- Savenko V.S., Shmideberg N.A. K metodike opredeleniya malykh kontsentratsiy ftora v prirodnikh vodakh [To the method for determining low concentrations of fluorine in natural waters], *Gidrokhimicheskiye Materialy*, 1977, vol. 65, p. 96–101. (In Russian)
- Stryer L. *Biochemistry*, San Francisco, W.H. Freeman, 1975, 877 p.
- Weinstein L.H., Davison A.W. *Fluorides in the Environment: Effects on Plants and Animals*, Wallingford, Cambridge, CABI Publ., 2004, 296 p.
- Wen D., Zhang F., Zhang E., Wang C., Han S., Zheng Y. Arsenic, fluoride and iodine in groundwater of China, *J. Geochem. Explor.*, 2013, vol. 135, no. 10, p. 1–21.
- Web-source*  
McClelland J.W., Tank S.E., Spencer R.G.M., Shiklomanov A.I., Zolkos S., Holmes R.M. Arctic Great Rivers Observatory, Discharge Dataset, 2023, Version 20230406, URL: <https://arcticgreatrivers.org/data> (access date 12.04.2023).

Received 18.04.2023

Revised 03.05.2023

Accepted 27.07.2023

## ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ГОРОДСКОГО ОКРУГА ВЛАДИМИР

Т.А. Трифонова<sup>1</sup>, О.Г. Селиванов<sup>2</sup>, А.А. Марцев<sup>3</sup>, И.Н. Курочкин<sup>4</sup>,  
Ю.Н. Курбатов<sup>5</sup>, Л.Н. Романова<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра географии почв

<sup>1–6</sup> Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, институт биологии и экологии,  
кафедра биологии и экологии

<sup>1</sup> Профессор, д-р биол. наук; e-mail: tatrifon@mail.ru

<sup>2</sup> Ст. науч. сотр.; e-mail: selivanov6003@mail.ru

<sup>3</sup> Доц., канд. биол. наук; e-mail: martsevaa@yandex.ru

<sup>4</sup> Аспирант; e-mail: ivan33vl@yandex.com

<sup>5</sup> Аспирант; e-mail: iur.curbatov@gmail.com

<sup>6</sup> Магистр; e-mail: Ludmila.romanova98@yandex.ru

Представлены результаты проведенных в августе 2022 г. исследований воды рек городского округа Владимир на содержание тяжелых металлов и изучен их анионно-катионный состав. Показано, что в пробах воды рек городского округа есть превышение значений гигиенических и рыбохозяйственных нормативов по ряду тяжелых металлов (свинец, железо, кадмий, цинк, медь и ванадий) и ионов (аммоний, магний, сульфаты, нитраты, фториды, фосфаты), что связано как с хозяйственной деятельностью человека, так и с региональной спецификой геохимического состава водовмещающих пород и особенностями режима функционирования и питания подземных вод. В воде р. Нерль, являющейся источником питьевого водоснабжения г. Владимира, обнаружено содержание калия в концентрации, соответствующей нижнему порогу физиологической полноценности, что может отрицательно отразиться на здоровье жителей города при длительном употреблении такой воды. Показано, что недостаточная очистка промышленных стоков на очистных сооружениях предприятий от биогенных элементов может приводить к их попаданию в водные объекты в концентрациях, превышающих гигиенические и рыбохозяйственные нормативы. Это, в свою очередь, может способствовать накоплению других элементов. В связи с жесткими требованиями к концентрации химических элементов, предъявляемыми к водным объектам рыбохозяйственного назначения, необходимо совершенствовать оборудование и технологические схемы очистки на очистных сооружениях. Малые реки городов являются уязвимыми и мало защищенными, поэтому они требуют к себе особого внимания природоохранных органов. Являясь притоками более крупных рек, малые реки формируют качество их вод. В случае использования для нужд хозяйственно-питьевого назначения они являются фактором, определяющим здоровье городских жителей.

**Ключевые слова:** загрязнение рек, тяжелые металлы, анионы и катионы

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.13

### ВВЕДЕНИЕ

Клязьма и Нерль, по площади бассейна относящиеся к средним рекам, играют важнейшую роль в жизни областного города Владимира. Их вода после предварительной водоподготовки и смешения с подземными водами Судогодского водозабора используется для централизованной подачи большей части населения городского округа на хозяйственно-питьевые нужды. По данным администрации Владимира, местные реки, согласно [ГОСТ 2761–84, 2006], относятся ко второму классу по качеству воды [Жилищно-коммунальное..., 2023], т. е. для ее использования в питьевых целях нужны специальные методы очистки. К основным загрязнителям относятся биогенные элементы, органические

вещества, азот аммонийный и азот нитратов, различные металлы [Лямперт и др., 2022]. По данным Владимирского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС), за период с 2018 по 2021 г. были выявлены случаи высокого загрязнения воды р. Клязьмы в пределах городского округа Владимир по железу, нитритному и аммонийному азоту [Ежегодный доклад..., 2019–2022].

К малым рекам, протекающим в границах городского округа Владимир, относятся Лыбедь, Рпень и Содышка. Состояние и качество их воды во многом зависит от количества и степени очистки промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод, сбрасываемых различными предприятиями города. Так, например, в 2021 г. сброс загрязненных сточных



вод во Владимире составил 29,74 млн м<sup>3</sup> [Ежегодный доклад..., 2022]. Эти значения растут ежегодно, что во многом связано с неудовлетворительным состоянием большинства очистных сооружений на территории региона: из 194 имеющихся очистных сооружений биологической и механической очистки 60% подлежат капитальному ремонту, а 30% – реконструкции [Ежегодный доклад..., 2022].

Антропогенное воздействие на малые реки значительное, а самоочищающая способность их ограничена. При этом роль этих рек для города велика – по берегам размещены населенные пункты, дачные поселки, новые жилые микрорайоны, для жителей города они являются зонами активного отдыха. Состояние этих рек является одним из главных экологических вопросов, волнующих местных жителей.

Поэтому цель данной работы – эколого-гигиеническая оценка поверхностных вод городского округа Владимир.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено 16–17 августа 2022 г. Объект исследования – поверхностные водные источники, протекающие по территории городского округа Владимир (рис.). Это малые реки: Содышка (точки № 1–4), Рпень (№ 5, 6), Лыбедь (№ 7, 8) и средние реки: Нерль (№ 9, 10), которая территориально хоть и не протекает по территории городского округа, но имеет большое значение в его централизованном хозяйственно-питьевом снабжении, а также главная водная артерия региона – река Клязьма (№ 11, 12).

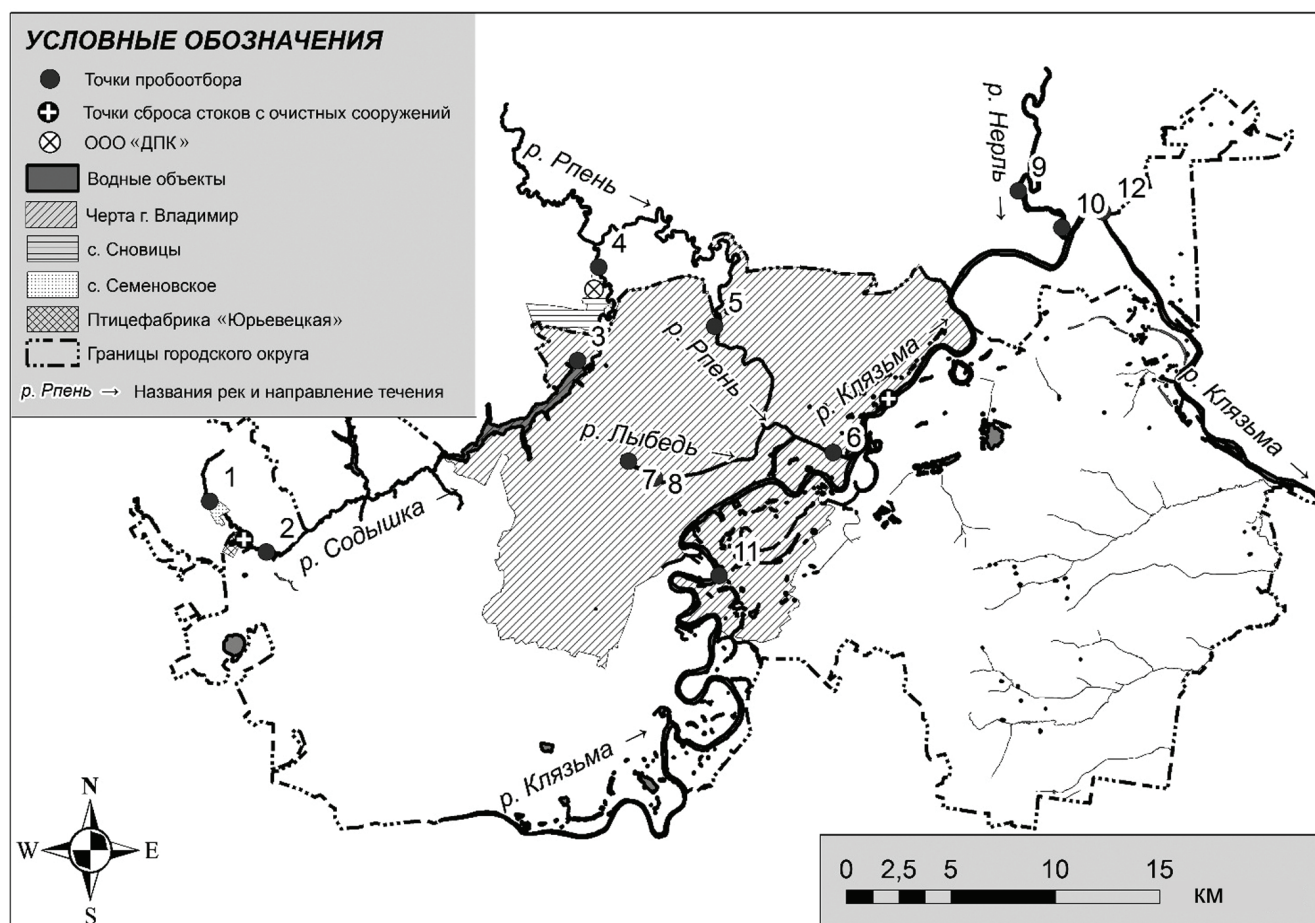


Рис. Точки отбора проб

Fig. Sampling points

Пробы речной воды отбирались в период летней межени в соответствии с ГОСТ Р 51592-00. Анализы проб воды были проведены в течение трех дней после отбора. Их хранение осуществлялось при температуре +2...+5°C в темном месте. Перед анализом пробы предварительно фильтровали для отделения взвешенных веществ и различных нераствори-

мых форм через бумажный фильтр «синяя лента». Определение концентраций тяжелых металлов в воде проводили в соответствии с методикой М-049-ВП/09 «Методика выполнения измерений массовой концентрации свинца, цинка, меди, никеля, кобальта, железа, хрома, ванадия, висмута, кадмия, селена, мышьяка в природных, питьевых и сточных водах

рентгенофлуоресцентным методом после концентрирования их пирролидиндитиокарбаминатных комплексов на фильтрах» (ПНД Ф 14.1:2:4.208-04). Определение концентраций катионов в воде проводили по методике М 01-31-2011 «Определение неорганических катионов в воде» (ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000 (изд. 2011 г.)). Определение концентраций анионов проводили в соответствии с методикой М 01-58-2018 «Определение неорганических анионов в воде» (ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18). Оценку содержания химических элементов в пробах проводили в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», а также в соответствии с Приказом Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 г. «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» Физиологическую полноценность воды, т. е. наличие необходимых в физиологическом отношении макро- и микроэлементов в оптимальном для организма человека количестве, определяли в соответствии с СанПин 2.1.4.1116-02 «Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества».

Картографирование проводили с помощью ГИС программы ArcMap.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования установлено превышение ПДК по свинцу в пробах из рек Нерль и Лыбедь, что, вероятно, связано с непосредственной близостью автодорог и высоким потоком здесь автомобильного транспорта, способствующего попаданию техногенного свинца в поверхностные воды. Ранее было установлено, что, например, в почве придорожных территорий, подверженных воздействию исключительно автомобильного транспорта, накопление свинца происходит быстрее остальных тяжелых металлов [Марцев и др., 2022]. Отмечено значительное превышение ПДК по кадмию в створе № 4. Учитывая, что в пробах воды выше по течению кадмия обнаружено не было, его попадание здесь может быть связано, например, со сбросом неочищенных или плохо очищенных промышленных стоков. В непосредственной близости от створа № 4 ведет деятельность предприятия по производству древесно-полимерных композиций на основе поливинилхлорида (ПВХ) ООО «ДПК». Соединения кадмия могут быть использованы в каче-

стве стабилизатора [Лутфуллаев, Давронова, 2019]. Это вещество может частично попадать в почву на производственной территории, например, из-за неправильного хранения или нарушений в технологии производства, и в дальнейшем вымываться в близкорасположенный поверхностный сток (р. Содышка), либо может попадать в водный объект со стоками напрямую.

Установлено содержание высоких концентраций железа, что является серьезной региональной проблемой, вызванной рядом причин. В реках Нерль и Клязьме данное обстоятельство, вероятно, обусловлено влиянием притоков, дренирующих заболоченные территории. Так, например, для всех рек верховых болот Мещерской низменности, часть которых являются притоками Клязьмы, характерно повышенное содержание общего железа (2,3–8,2 мг/л) [Ахметьева и др., 2021]. Ожелезнение болотных вод связано с процессами минерализации торфа, в ходе которых железо высвобождается из железоорганических соединений, благодаря деятельности гетеротрофных железобактерий [Шварева и др., 2014]. Дополнительным источником железа может служить его сброс со сточными водами.

Высокие концентрации железа в малых реках (Лыбедь, Рпень и Содышка), вероятно, вызваны другими причинами. Например, с присутствием в урбанизированных почвах города техногенного железа, прежде всего магнетита  $Fe_3O_4$ , поступающего в почву с частицами атмосферных выбросов промышленных предприятий и предприятий топливно-энергетического комплекса, а также с аэральными отходами эмиссии автомобилей [Марцев и др., 2022; Водяницкий, Шоба, 2015]. Постепенное вымывание железа из городской почвы приводит к поддержанию его повышенного значения в поверхностных водах. Попаданию железа в поверхностные воды может способствовать и активное использование жителями частного сектора, коттеджных поселков, садовых товариществ, не имеющих центрального водоснабжения, подземных вод (артезианские скважины, колодцы) для хозяйственно-бытовых нужд. В силу региональной специфики геохимического состава водовмещающих пород и особенностей режима функционирования и питания, они характеризуются повышенным содержанием различных микроэлементов, в том числе и железа [Ежегодный доклад..., 2022]. Таким образом, весь объем подземной воды, используемый населением для хозяйственно-бытовых нужд, в конечном итоге в виде стоков попадает в поверхностные источники, что также может определять высокое содержание железа в водах рек г. Владимира.

Известно, что рыбохозяйственные нормативы более жесткие, чем их санитарно-гигиенические

аналоги. Если оценивать состояние рек города с точки зрения возможного влияния тяжелых металлов на гидробионты, то окажется, что, помимо перечисленных выше трех элементов, по всем точкам отбора проб наблюдаются превышения ПДК по меди (3–46 раз), цинку (2,6–24,1 раза) и ванадию (6–9 раз). Цинк и медь являются одними из важнейших незаменимых элементов для жизнедеятельности животных и растений, однако в избыточных концентрациях это опасные токсиканты. Основным источником поступления меди в природные воды являются сточные воды предприятий химической и металлургической промышленности. Цинк поступает в природные воды со сточными водами гальванических цехов. Ванадий также относится к микроэлементам, необходимым практически всем живым организмам, особое значение он имеет для роста и развития растений; находится преимущественно в рассеянном состоянии и обнаруживается в нефти, асфальтах, битумах, горючих сланцах, углях и др. Одним из главных источников загрязнения природных вод ванадием являются нефть и продукты ее переработки.

В связи с тем что в часть г. Владимира в качестве хозяйственно-питьевого назначения подается вода поверхностных источников (место водозабора – слияние рек Нерли в Клязьмы) [Схема..., 2023], необходима ее оценка на физиологическую полноценность, которая определяется ее ионным составом. По содержанию ионов магния и кальция воды Нерли и Клязьмы соответствуют нормам физиологической полноценности. По калию, при физиологической норме 2–20 мг/дм<sup>3</sup>, пробы р. Клязьмы соответствуют, а вот пробы р. Нерли имеют нижний предел физиологической полноценности (1,93–2,14 мг/дм<sup>3</sup>). Длительное употребление такой воды может негативно отразиться на здоровье населения.

В пробах воды р. Содышки установлено близкое к гигиеническим и превышение по рыбохозяйственным значениям ПДК содержание ионов аммония (створы № 1, 4), что возможно связано с попаданием хозяйственно-бытовых стоков от прилегающих к реке населенных пунктов. В створе № 2 установлено превышение ПДК ионов магния, что, вероятно, связано с недостаточной степенью очистки промышленных стоков птицефабрики, расположенной немного выше по течению. Известно, что для сбалансированности питания в рацион кур мясного направления и кур-несушек добавляют микроэлементы минерального происхождения, в том числе и магний в виде карбоната, сульфата, оксида или гидроксида магния.

Во всех водоемах обнаружено превышение рыбохозяйственных нормативов по содержанию фосфат-ионов. Избыточное содержание фосфатов

в воде может быть отражением присутствия примесей удобрений, компонентов хозяйственно-бытовых сточных вод, разлагающейся биомассы. По хлоридам, сульфатам, нитратам и фторидам в реках Нерль, Клязьма и Рпень превышение рыбохозяйственных и гигиенических значений ПДК в воде не обнаружено. В р. Лыбедь установлено незначительное превышение рыбохозяйственных ПДК по сульфат-ионам.

Что касается р. Содышка, в которую сбрасываются очищенные стоки птицефабрики (между створами № 1 и 2), то здесь обнаружено превышение норм по нитратам (створы № 2 и 4), фторид-ионам (створы № 2 и 4 (для рыбохозяйственных ПДК)), по фосфатам-ионам (створ № 2) и по сульфат-ионам ((створ № 2) для рыбохозяйственных ПДК). Известно, что для производственных стоков, образующихся в процессе работы птицефабрик, характерно высокое содержание соединений азота и фосфора. Плохая очистка от этих соединений на очистных сооружениях приводит к их попаданию в водные объекты, вызывая в них усиленную эвтрофикацию. Сульфат-ионы образуются при диссоциации солей, образованию которых способствуют сульфатредуцирующие бактерии. Причиной высоких концентраций сульфат-ионов в створе № 2, по нашему мнению, является отмирание живых организмов, являющееся логичным следствием процессов эвтрофикации. Известно, что сульфаты способствуют выщелачиванию фторидов [Усова и др., 2017]. Еще одной причиной высокой концентрации фтора может служить его попадание в воду с остатками суперфосфата, который является важным компонентом при утилизации птичьего помета.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, установлено, что поверхностные воды городского округа Владимир подвержены загрязнению такими тяжелыми металлами, как свинец, железо, кадмий, цинк, медь и ванадий, что связано как с хозяйственной деятельностью человека, так и с региональной спецификой геохимического состава водовмещающих пород и особенностями режима функционирования и питания подземных вод.

Установлено превышение предельно допустимых концентраций по анионам и катионам. Данные гидрохимических исследований качества воды водоемов показывают, что недостаточная очистка промышленных стоков на очистных сооружениях предприятий от биогенных элементов может приводить к их попаданию в водные объекты в концентрациях, превышающих гигиенические и рыбохозяйственные нормативы, и способствовать накоплению других элементов.



Малые реки городов являются уязвимыми и мало защищенными, поэтому требуют к себе особого внимания природоохранных органов. В связи с жесткими требованиями к концентрации химических элементов, предъявляемыми к водным объектам рыбохозяйственного назначения, необходимо совершенствовать оборудование и технологические

схемы очистки на очистных сооружениях. Являясь притоками более крупных рек, малые реки формируют качество их вод и являются фактором, определяющим здоровье городских жителей, в случае использования воды для нужд хозяйственно-питьевого назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахметьева Н.П., Михайлова А.В., Кричевец Г.Н. Гидрохимический режим болотных рек Мещерской низменности // Труды Инсторфа. 2021. № 24(77). С. 15–25.
- Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А. Магнитная восприимчивость как индикатор загрязнения тяжелыми металлами городских почв (обзор литературы) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2015. № 1. С. 13–20.
- ГОСТ 2761-84. Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора. М.: Стандартинформ, 2006. 150 с.
- Ежегодный доклад «О состоянии окружающей среды и здоровья населения Владимирской области в 2018 году». Владимир: Экология региона, 2019. Вып. 26. 165 с.
- Ежегодный доклад «О состоянии окружающей среды и здоровья населения Владимирской области в 2019 году». Владимир: Экология региона, 2020. Вып. 27. 135 с.
- Ежегодный доклад «О состоянии окружающей среды и здоровья населения Владимирской области в 2021 году». Владимир: Экология региона, 2022. Вып. 29. 178 с.
- Лямперт Н.А., Ничипорова И.П., Лобченко Е.Е., Первышева О.А. Современное состояние и динамика качества воды р. Клязьмы // Успехи современного естествознания. 2022. № 3. С. 104–110.
- Марцев А.А., Селиванов О.Г., Трифонова Т.А. Оценка почвы придорожной территории автодороги Р72 по содержанию тяжелых металлов и мышьяка // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 7. С. 730–735.
- Усова Е.В., Орехова Ю.В., Воробьев Е.В. Сезонные колебания содержания сульфат-ионов в реках Миус и Кранка за период 2007–2016 гг. // Вода: химия и экология. 2017. № 11–12 (113). С. 14–19.
- Шварева И.С., Трифонов К.И., Никифоров А.Ф. Гидрохимический мониторинг водных экосистем Национального парка «Мещера» // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 1. С. 58–74.
- Электронные ресурсы*
- Лутфуллаев С.Ш., Давронова Ф.Л. Стабилизация ПВХ химическими добавками // Universum: химия и биология. 2019. № 7(61). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/7583> (дата обращения 01.02.2023).
- Схема водоснабжения и водоотведения города Владимира до 2024 года. URL: <https://vladimir-city.ru/economics/zhkh/Shema%20VVK/> (дата обращения 01.02.2023).
- Жилищно-коммунальное хозяйство. Город Владимир // Официальный сайт органов местного самоуправления. URL: <https://vladimir-city.ru/economics/zhkh/help.php> (дата обращения 01.02.2023).

Поступила в редакцию 14.02.2023

После доработки 16.05.2023

Принята к публикации 27.07.2023

## ASSESSMENT OF CHEMICAL POLLUTION OF THE SURFACE WATER IN VLADIMIR

T.A. Trifonova<sup>1</sup>, O.G. Selivanov<sup>2</sup>, A.A. Martsev<sup>3</sup>, I.N. Kurochkin<sup>4</sup>,  
Yu.N. Kurbatov<sup>5</sup>, L.N. Romanova<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Department of Soil Geography

<sup>1-6</sup> Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov,  
Institute of Biology and Ecology, Department of Biology and Ecology

<sup>1</sup> Professor, D.Sc. in Biology; e-mail: [tatrifon@mail.ru](mailto:tatrifon@mail.ru)

<sup>2</sup> Senior Reseacher; e-mail: [selivanov6003@mail.ru](mailto:selivanov6003@mail.ru)

<sup>3</sup> Associate professor, Ph.D. in Biology; e-mail: [martsevaa@yandex.ru](mailto:martsevaa@yandex.ru)

<sup>4</sup> Postgraduate student; e-mail: [ivan33vl@yandex.com](mailto:ivan33vl@yandex.com)

<sup>5</sup> Postgraduate student; e-mail: [iur.kurbatov@gmail.com](mailto:iur.kurbatov@gmail.com)

<sup>6</sup> Master; e-mail: [Ludmila.romanova98@yandex.ru](mailto:Ludmila.romanova98@yandex.ru)

The results of studies of river water of the Vladimir city district for the content of heavy metals conducted in August 2022 are presented and the anionic-cationic composition of water is analyzed. It is shown that a number of heavy metals (lead, iron, cadmium, zinc, copper and vanadium) and ions (ammonium, magnesium, sulfates, nitrates, fluorides, phosphates) in water samples of the rivers of the city district exceed hygienic and fishery standards, which is due to both human economic activity and regional specifics of the geochemical composition of water-bearing rocks and features of groundwater functioning and feeding. The potassium concentration in water of the Nerl river, which is a drinking water source for Vladimir, corresponds to the lower threshold of physiological competence, which can affect the health of city residents if they use such water for a long time. It is shown that insufficient extraction of biogenic elements at the treatment facilities of enterprises could lead to their ingress into water bodies in concentrations exceeding hygienic and fishery standards. This in turn could contribute to the accumulation of other elements. Strict requirements for the content of chemical elements in fishery water bodies make it necessary to improve the equipment and technological schemes of purification at treatment facilities. Small rivers of cities are vulnerable and poorly protected; therefore they require special attention of environmental authorities. Being tributaries of larger rivers, small rivers form the quality of their waters. If they are used for the household and drinking purposes, they become a factor determining the health of urban residents.

**Keywords:** river pollution, heavy metals, anions and cations

## REFERENCES

- Akhmet'eva N.P., Mikhailova A.V., Krichevets G.N. *Gidrokhimicheskii rezhim bolotnykh rek Meshcherskoi nizmennosti* [Hydrochemical regime of swamp rivers of the Meschera Lowland], *Trudy Instorfa*, 2021, no. 24(77), p. 15–25. (In Russian)
- Ezhegodnyi doklad "O sostoyanii okruzhayushchei sredy i zdorov'ya naseleniya Vladimirskoi oblasti v 2018 godu"* [Annual report "On the state of the environment and the health of the population of the Vladimir region in 2018"], Vladimir, Ekologiya regiona Publ., 2019, iss. 26, 165 p. (In Russian)
- Ezhegodnyi doklad "O sostoyanii okruzhayushchei sredy i zdorov'ya naseleniya Vladimirskoi oblasti v 2019 godu"* [Annual report "On the state of the environment and the health of the population of the Vladimir region in 2019"], Vladimir, Ekologiya regiona Publ., 2020, iss. 27, 135 p. (In Russian)
- Ezhegodnyi doklad "O sostoyanii okruzhayushchei sredy i zdorov'ya naseleniya Vladimirskoi oblasti v 2021 godu"* [Annual report "On the state of the environment and the health of the population of the Vladimir region in 2021"], Vladimir, Ekologiya regiona Publ., 2022, iss. 29, 178 p. (In Russian)
- GOST 2761-84. *Istochniki tsentralizovannogo khozyaystvenno-pit'yevogo vodosnabzheniya. Gigiyenicheskiye, tekhnicheskiye trebovaniya i pravila vybora* [Sources of centralized domestic drinking water supply. Hygienic, technical requirements and selection rules], Moscow, Standartinform Publ., 2006, 150 p.
- Lyampert N.A., Nichiporova I.P., Lobchenko E.E., Pervysheva O.A. *Sovremennoe sostoyanie i dinamika kachestva vody r. Klyaz'my* [The current state and dynamics of water quality of the Klyazma river], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2022, no. 3, p. 104–110. (In Russian)
- Martsev A.A., Selivanov O.G., Trifonova T.A. *Otsenka pochvy pridorozhnoi territorii avtodorogi R72 po sodержaniyu tyazhelykh metallov i mysh'yaka* [Assessment of the soil on the roadside of the P72 highway in terms of the content of heavy metals and arsenic], *Gigiena i sanitariya*, 2022, vol. 101, no. 7, p. 730–735. (In Russian)
- Shvareva I.S., Trifonov K.I., Nikiforov A.F. *Gidrokhimicheskii monitoring vodnykh ekosistem Natsional'nogo parka "Meshchera"* [Hydrochemical monitoring of aquatic ecosystems of the Meschera National Park], *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*, 2014, no. 1, p. 58–74. (In Russian)
- Usova E.V., Orekhova Yu.V., Vorob'ev E.V. *Sezonnye kolebaniya sodержaniya sul'fat-ionov v rekakh Mius i Kranka za period 2007–2016 gg.* [Seasonal fluctuations in the content of sulfate ions in the Mius and Kranka rivers for the period of 2007–2016], *Voda: khimiya i ekologiya*, 2017, no. 11–12(113), p. 14–19. (In Russian)
- Vodyanitskii Yu.N., Shoba S.A. *Magnitnaya vospriimchivost' kak indikator zagryazneniya tyazhelymi metallami gorodskikh pochv (obzor literatury)* [Magnetic susceptibility as an indicator of heavy metal pollution of urban soils (literature review)], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 17, Pochvovedenie*, 2015, no. 1, p. 13–20. (In Russian)
- Web sources*
- Lutfullaev S.Sh., Davronova F.L. *Stabilizatsiya PVKh khimicheskimi dobavkami* [Stabilization of PVC with chemical additives], *Universum: khimiya i biologiya: elektron. nauchn. Zhurn*, 2019, no. 7(61), URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/7583> (access date 01.02.2023). (In Russian)
- Skhema vodosnabzheniya i vodootvedeniya goroda Vladimira do 2024 goda [The scheme of water supply and sanitation of the city of Vladimir until 2024], URL: <https://vladimir-city.ru/economics/zhkh/Shema%20VVK/> (access date 01.02.2023) (In Russian)
- Zhilishchno-kommunal'noye khozyaystvo. Gorod Vladimir [Department of Housing and Utilities. City of Vladimir], Ofitsial'nyy sayt organov mestnogo samoupravleniya [Official site of local governments], URL: <https://vladimir-city.ru/economics/zhkh/help.php> (access date 01.02.2023).

Received 14.02.2023

Revised 16.05.2023

Accepted 27.07.2023

## УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ И МАТЕРИАЛОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2023 Г.

| Статья                                                                                                                                                                          | DOI                             | № | Стр. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---|------|
| <i>Авессаломова И.А., Иванов А.Н.</i> Биогеохимические особенности орнитогенных геосистем Северо-Западной Пацифики (на примере островов Топоркова и Старичкова)                 | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.10 | 3 | 125  |
| <i>Агирречу А.А.</i> Столетие первой учебной географической практики Московского университета в Подмоскowie                                                                     | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.11 | 1 | 129  |
| <i>Акимова В.В., Купцова М.А.</i> Глобальные производственные сети в швейной промышленности Азии                                                                                | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.6  | 3 | 68   |
| <i>Андреев Т.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю.</i> Энергетический потенциал агробиомассы в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях                              | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.5  | 6 | 50   |
| <i>Бабкин Р.А., Махрова А.Г.</i> Объединенные города Московской области: результат эволюционного развития или административных преобразований                                   | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.4  | 6 | 38   |
| <i>Бабурин В.Л., Горячко М.Д., Демидова К.В., Макушин М.А.</i> Центр-периферийная модель размещения промышленности: мир и Россия                                                | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.1  | 4 | 3    |
| <i>Бадина С.В., Панкратов А.А., Бабурин В.Л., Бобровский Р.О.</i> Классификация секторов экономики по степени их техногенной опасности                                          | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.1  | 3 | 3    |
| <i>Бакланов П.Я., Мошков А.В., Ткаченко Г.Г., Шведов В.Г.</i> Большое Дальневосточное транспортно-экономическое кольцо: структура и функции в пространственном развитии региона | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.7  | 2 | 73   |
| <i>Барабанов А.Т., Петелько А.И.</i> Факторы склонового весеннего стока на серых лесных почвах в центральной лесостепи                                                          | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.2  | 4 | 18   |
| <i>Баранова М.С., Филиппов О.В., Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С.</i> Стадии развития пересыпей во входных створах заливов Волгоградского водохранилища                          | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.11 | 3 | 137  |
| <i>Березкин В.Ю., Коробова Е.Н., Данилова В.Н.</i> Йод и селен в почвах Брянской области (на примере бассейна р. Титовки)                                                       | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.1  | 1 | 3    |
| <i>Богданова М.Д., Герасимова М.И.</i> Почвенные карты в комплексных региональных атласах Российской Федерации                                                                  | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.3  | 1 | 28   |
| <i>Боголюбовский А.В., Дубинин Е.П.</i> Строение и динамика эндогенного рельефа трансформной зоны Тьёрнес (Северная Исландия)                                                   | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.12 | 3 | 152  |
| <i>Болховская Н.С., Ульянов В.А., Шуньков М.В.</i> Палиноклиматостратиграфия и условия формирования плейстоценовых отложений пещеры Трлица (Черногория)                         | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.10 | 6 | 107  |
| <i>Бочкарев Ю.Н., Дьяконов К.Н., Соромотин А.В., Сизов О.С.</i> Дендрохроноиндикация изменения местного климата городской территории Надыма за последние 50 лет                 | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.12 | 5 | 125  |
| <i>Виктулина М.А., Романенко Ф.А., Зимин М.В., Ефимова Л.Е., Покровский Б.Г.</i> Строение и динамика снежно-ледяных образований в Хибинских горах в XXI веке                    | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.8  | 2 | 89   |
| <i>Воробьев М.И., Алексеев А.И.</i> «Оптимизация» сети сельских школ: плюсы и минусы (пример Уваровского района Тамбовской области)                                             | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.13 | 4 | 146  |
| <i>Горкина Т.И.</i> Особенности энергетического перехода азиатских стран                                                                                                        | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.2  | 3 | 18   |
| <i>Даценко Ю.С., Пуклаков В.В.</i> Баланс фосфора в водохранилищах сезонного и многолетнего регулирования                                                                       | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.12 | 1 | 137  |
| <i>Еришов А.М.</i> Типы сельских и городских местностей Польши, Венгрии, Румынии и европейской части России                                                                     | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.10 | 1 | 118  |
| <i>Заяц Д.В., Петрова А.С., Ткаченко Т.Х.</i> Трансформация региональной структуры современного мирового рынка кофе                                                             | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.2  | 5 | 10   |
| <i>Зверева А.А., Тихоцкая И.С.</i> Креативные индустрии в крупнейших городах Японии                                                                                             | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.7  | 4 | 75   |
| <i>Зелепукина Е.С., Гаврилкин С.А., Терехов А.В., Резников А.И.</i> Морфометрический анализ ландшафтной структуры аридных высокогорий на примере горного массива Монгун-Тайга   | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.8  | 4 | 87   |



Продолжение

| Статья                                                                                                                                                                                                                        | DOI                             | № | Стр. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---|------|
| Иванова Н.Н., Фомичева Д.В., Шамигурина Е.Н. Изменение ареалов пахотных угодий за 250 лет (на примере ключевого участка в Московской области)                                                                                 | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.5  | 3 | 52   |
| Имангулов Л.Р. Трансформация мордовской деревни Башкирии: географический анализ                                                                                                                                               | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.11 | 4 | 125  |
| Имангулов Л.Р. Этнические аспекты сельской миграции в Федоровском районе Республики Башкортостан                                                                                                                              | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.11 | 2 | 129  |
| Кажукало Г.А., Еременко Е.А., Романенко Ф.А. Антропогенная трансформация рельефа Норильского промышленного района                                                                                                             | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.10 | 4 | 107  |
| Клювиткина Т.С., Агафонова Е.А., Новичкова Е.А., Лозинская Л.А., Чеховская М.П., Матуль А.Г., Кравчишина М.Д. Условия осадконакопления в районе хребта Книповича (Норвежское море) в голоцене по данным анализа микрофоссилий | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.11 | 6 | 119  |
| Ковалева И.В., Суслин В.В. Влияние атмосферных осадков и поверхностного стока на показатели фитопланктона в северной части Черного моря                                                                                       | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.3  | 4 | 28   |
| Колтовская Е.В., Немировская И.А. Распределение взвешенного вещества и углеводов в морях Карском и Лаптевых в августе – сентябре 2018 г.                                                                                      | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.7  | 1 | 81   |
| Кондратьев С.И., Орехова Н.А. Потенциальные угрозы экологическому состоянию вод Севастопольской бухты                                                                                                                         | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.1  | 6 | 3    |
| Кондрин А.Т., Кораблина А.Д. Стонно-нагонные колебания уровня Белого моря по данным наблюдений 2004–2020 гг.                                                                                                                  | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.8  | 6 | 86   |
| Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А., Денисова А.П., Ананьев Р.А., Сухих Е.А., Никифоров С.Л., Соколов С.Ю. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей           | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9  | 3 | 104  |
| Крутов О.Д., Савоскул М.С., Алексеев А.И. Усадебный кластер как форма рационального использования культурного наследия (на примере Торжокского района Тверской области)                                                       | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.14 | 1 | 148  |
| Кузыченко Ю.А., Катков К.А. Оценка состояния и почвозащитная обработка пахотных почв Ставропольского края                                                                                                                     | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.3  | 3 | 30   |
| Кулешова Л.А., Матуль А.Г., Казарина Г.Х., Баширова Л.Д. Четвертичные кремневые микрофоссилии экваториальной Атлантики и их роль в палеоокеанологических реконструкциях                                                       | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.4  | 5 | 27   |
| Куропан С.А., Сарычев Д.В., Попова И.В. Дистанционное зондирование источников теплового загрязнения города Липецка                                                                                                            | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.3  | 6 | 27   |
| Куулар Х.Б. Состояние и динамика границ темнохвойных лесов хребта Западный Танну-Ола в Республике Тыва                                                                                                                        | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.4  | 4 | 40   |
| Леонов А.В., Архипкин В.С., Пицальник В.М., Латковская Е.М. Моделирование динамики концентрации растворенного кислорода в водах залива Анива (Охотское море)                                                                  | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.7  | 6 | 77   |
| Малхазова С.М., Шартова Н.В., Зелихина С.В., Орлов Д.С. Пространственная неоднородность в распространении клещевых инфекций на юге Дальнего Востока                                                                           | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.5  | 2 | 51   |
| Манаенков А.С., Подгаецкая П.М., Попов В.С. Влияние ползащитных лесных полос на развитие яровой пшеницы в приопушечной зоне посевов                                                                                           | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.9  | 4 | 97   |
| Маргарян В.Г., Фролова Н.Л., Гайдукова Е.В. Зимний термический режим рек бассейна Дебед (Армения)                                                                                                                             | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.5  | 1 | 52   |
| Мкртчян Н.В., Герасимов А.А. Зоны миграционного тяготения городов Алтайского края                                                                                                                                             | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.9  | 2 | 103  |
| Мышлявцева С.Э., Меркушев С.А., Ланин В.В. Методика оценки туристской привлекательности малых и средних городов (на материалах Пермского края)                                                                                | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.6  | 5 | 52   |
| Рагузин И.И., Быкова Е.Н., Лепихина О.Ю. Метод полигональной метрической сетки для оценки кадастровой стоимости земельных участков                                                                                            | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.8  | 3 | 92   |
| Разумовский Р.О., Еременко Е.А., Большов С.И., Фузеина Ю.Н., Боголюбский В.А., Журавлев П.Д., Жиба Р.Ю., Деркач А.А., Бредихин А.В., Дбар Р.С. Рельеф и геоморфологические опасности на территории городов Абхазии            | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.6  | 1 | 65   |

Продолжение

| Статья                                                                                                                                                                                                                       | DOI                             | № | Стр. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---|------|
| <i>Решетняк О.С., Комаров О.С.</i> Межгодовая и сезонная изменчивость стока растворенных веществ в дельтовых рукавах реки Кубани                                                                                             | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.8  | 1 | 95   |
| <i>Романов А.А.</i> География весеннего миграционного потока водно-околоводных птиц на плато Путорана                                                                                                                        | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.8  | 5 | 79   |
| <i>Романов А.А., Васеха Н.Д.</i> Структура зимней фауны млекопитающих в морях северо-востока Российской Палеарктики                                                                                                          | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.6  | 2 | 62   |
| <i>Савенко А.В., Савенко В.С., Новигатский А.Н.</i> Фтор в водах Северной Атлантики                                                                                                                                          | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.13 | 1 | 143  |
| <i>Савенко В.С.</i> О логических основаниях разных толкований понятия «гидросфера»                                                                                                                                           | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.1  | 5 | 3    |
| <i>Савенко А.В., Савенко В.С., Ефимов В.А.</i> Современное содержание фтора в водах реки Оби                                                                                                                                 | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.12 | 6 | 132  |
| <i>Семиколенных Д.В., Курбанов Р.Н., Янина Т.А.</i> Ингрессия Карангатского моря в Манычскую депрессию (поздний плейстоцен)                                                                                                  | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.9  | 6 | 96   |
| <i>Сенцов А.А., Агibalов А.О., Зайцев В.А., Полещук А.В., Хрусталеv Е.Ю.</i> Геоморфологические индикаторы сдвиговых перемещений на острове Уруп (Большая Курильская гряда)                                                  | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.7  | 3 | 82   |
| <i>Скафарик А.И., Киселева С.В.</i> Ресурсная обеспеченность и экономическая эффективность сетевых и солнечных станций малой мощности в регионах России                                                                      | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.4  | 2 | 36   |
| <i>Слука Н.А., Твердов И.К.</i> Изучение меняющихся компетенций Большого Парижа (к 100-летию А.Е. Слуки)                                                                                                                     | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.7  | 5 | 65   |
| <i>Смирнов И.П.</i> Пространственная структура малых городов: подходы к типологии (по материалам Центральной России)                                                                                                         | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.3  | 2 | 22   |
| <i>Смирнов И.П., Лебедев П.С.</i> Факторы пространственного роста малых городов Центральной России                                                                                                                           | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.5  | 5 | 42   |
| <i>Смирнова А.А., Виноградов Д.М.</i> Советский проект по преобразованию сельской местности на примере д. Верхняя Троица Тверской области                                                                                    | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.12 | 4 | 137  |
| <i>Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Чендев Ю.Г., Бочарников М.В.</i> Корреляционные связи и варьирование свойств агрочерноземов юга Среднерусской возвышенности                                                                | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.9  | 5 | 89   |
| <i>Талденкова Е.Е., Овсепян Я.С., Руденко О.В., Степанова А.Ю., Баух Х.А.</i> Изменения природной среды в ходе развития бореальной трансгрессии на северо-востоке Белого моря на примере детального изучения разреза Бычье-2 | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.5  | 4 | 51   |
| <i>Твердов И.К., Слука Н.А.</i> Лондон как центр притяжения зарубежных транснациональных корпораций                                                                                                                          | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.13 | 2 | 149  |
| <i>Тикунов В.С., Панин А.Н., Гайдуков В.Р.</i> Атласная информационная система для формирования интегральных индексов социально-экономического развития территорий                                                           | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.6  | 4 | 66   |
| <i>Тихонов А.С., Харитоновa Т.И.</i> Ландшафтно-экологический потенциал пустырей г. Астрахани                                                                                                                                | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.2  | 6 | 15   |
| <i>Ткаченко А.А.</i> Сельская местность: понятие и подходы к типологии                                                                                                                                                       | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.1  | 2 | 3    |
| <i>Трегубов О.Д., Разживин В.Ю., Шамов В.В., Лебедева Л.С.</i> Влияние ландшафтной структуры бассейнов на удельный меженный сток малых рек на севере и юге Чукотки                                                           | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.9  | 1 | 106  |
| <i>Трифоновa Т.А., Селиванов О.Г., Марцев А.А., Курочкин И.Н., Курбатов Ю.Н., Романова Л.Н.</i> Оценка химического загрязнения поверхностных вод городского округа Владимир                                                  | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.13 | 6 | 139  |
| <i>Харченко С.В., Голосов В.Н., Цыпленков А.С., Федин А.В., Успенский М.И.</i> Темпы современной денудации малого водосбора в среднегорном поясе Большого Кавказа (на примере водосбора Гитче-Гижигит)                       | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.4  | 3 | 38   |
| <i>Хикматов Ф.Х., Фролова Н.Л., Юнусов Г.Х., Даценко Ю.С.</i> Количественная оценка возвратных коллекторно-дренажных вод с орошаемых территорий аридных зон                                                                  | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.12 | 2 | 141  |

Окончание

| Статья                                                                                                                                                                                                                                                                             | DOI                             | № | Стр. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---|------|
| Чалов Р.С. Пойменно-русловые разветвления: условия формирования и гидро-лого-морфологическая характеристика                                                                                                                                                                        | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.2  | 2 | 10   |
| Чалов Р.С., Камышев А.А., Куракова А.А., Голубцов Г.Б. Формирование разветвлений на излуцинах русел рек                                                                                                                                                                            | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.6  | 6 | 64   |
| Чалов С.Р., Завадский А.С., Головлев П.П., Иванов В.А. Руслвая составляющая стока наносов: особенности проявления на крупных реках России                                                                                                                                          | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.11 | 5 | 115  |
| Шартова Н.В., Грищенко М.Ю., Ватлина Т.В. Территориальная доступность медицинских учреждений для жителей севера России                                                                                                                                                             | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.10 | 5 | 104  |
| Шинкаренко С.С., Васильченко А.А. Современное состояние нерестилищ Нижнего Дона по данным дистанционного зондирования                                                                                                                                                              | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.2  | 1 | 16   |
| Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Моделирование статистических параметров мутности воды в водотоках                                                                                                                                                                                    | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.4  | 1 | 43   |
| Янина Т.А., Курбанов Р.Н., Таратунина Н.А., Романис Т.В., Ельцов М.В., Лаврентьев Н.В., Глушанкова Н.И., Ремизов С.О., Иванов Я.Д., Куприянова М.Д., Очередной А.К. Палеолитическая стоянка «Сухая Мечетка» (Волгоград) в контексте стратиграфии и палеогеографии Нижнего Поволжья | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.10 | 2 | 113  |
| Янина Т.А., Сорокин В.М., Семиколенных Д.В. Каспийские моллюски в Карангатском бассейне Черного моря (поздний плейстоцен)                                                                                                                                                          | 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.3  | 5 | 20   |



# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ СТАТЕЙ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ 5. ГЕОГРАФИЯ»

## Общие требования к статье

Журнал «Вестник Московского университета. Серия 5. География» публикует результаты оригинальных исследований в различных областях географической науки, теоретические, методические и обзорные статьи, представляющие интерес для мирового научного сообщества. Представленные к опубликованию материалы должны соответствовать формальным требованиям журнала, пройти процедуру слепого рецензирования и получить рекомендацию к публикации на заседании редколлегии журнала. Решение о публикации принимается на основе научной значимости и актуальности представленных материалов. Статьи, отклоненные редакционной коллегией, повторно не принимаются и не рассматриваются.

Объем статьи (текст, таблицы, список литературы, рисунки, перевод на английский) не должен превышать 1 а. л. (40 тыс. печатных знаков, включая пробелы, 5 рисунков), не более 50 тыс. знаков для обзорных статей. Объем кратких сообщений составляет 0,25 а. л. Рекомендуемый список литературы – до 30 наиболее актуальных работ по рассматриваемому вопросу. В обзорных статьях список литературы не должен превышать 60 источников. Для кратких сообщений список литературы может быть до 10 источников. Самоцитирований в списке литературы не должно быть более 10% от общего числа использованных источников.

Статья должна быть четко структурирована и включать рубрики: введение; материалы и методы исследований; результаты исследований и их обсуждение; выводы; список литературы.

Все материалы статьи компонуется **в единый сводный файл в формате Word** и размещаются в нем в следующей последовательности:

1. УДК;
2. Название статьи;
3. Инициалы и фамилия автора(ов);
4. Для каждого автора приводится полное название учреждения, в котором выполнялось исследование, подразделение (кафедра, лаборатория и т. п.), уч. степень, должность, *e-mail*;
5. Аннотация статьи;
6. Ключевые слова;
7. Текст статьи;
8. Благодарности, в том числе – финансирование;
9. Список литературы;
10. Таблицы;
11. Подписуточные подписи;
12. Рисунки;
13. Перевод на английский язык пунктов 2–6, 8–9,
11. В пункте 4 просьба использовать в переводе официальное наименование организации на английском языке (а не собственный вариант перевода).

## Подготовка текста

*Текст* набирается 12 кеглем через один интервал, поля слева, сверху и снизу – 2 см, справа – 1,5 см. Не допускается использование табулятора или пробелов для обозначения абзаца, ручных переносов в словах, переносов строк клавишей Enter в рамках одного предложения, разрывов страниц и разделов. В тексте статьи возможно использование полужирного шрифта и курсива для смысловых выделений, однако не должно использоваться подчеркивание. Десятичная часть чисел отделяется запятой.

*Формулы* набираются в редакторе формул в отдельную строку и имеют сквозную нумерацию по всей статье, выровненную по правому краю строки.

*Таблицы* набираются в Word, не допускается разделение ячеек косой линией. Ручные переносы не допускаются.

*Рисунки* представляются отдельными файлами, названными по их номерам (например: рис.1.tiff, рис.2.jpg), в графическом формате (eps, tif, jpg) разрешением не менее 300 dpi для полутонных и 600 dpi для черно-белых изображений и графиков. Для графиков, выполненных в Excel, дополнительно прилагаются соответствующие файлы Excel. Картинки должны быть полностью готовы к изданию. Представление рисунков в виде схем Word или набранного текста с добавлением графических элементов, наложенных сверху, **не допускается**.

*Ссылка на источник* в тексте документа указывается в квадратных скобках. В тексте ссылки через запятую указывается фамилия автора и год издания. Если ссылок несколько – они отделяются друг от друга точкой с запятой. Ссылка на источник на иностранном языке указывается на языке оригинала. Список русскоязычной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003, 7.82–2001 и 7.0.5–2008. DOI (при наличии) указывается в конце ссылки. Ссылка на источник на английском языке оформляется единообразно и в русскоязычном, и в переведенном на английский язык списке литературы. **При наличии у русскоязычного издания, которое фигурирует в списке литературы, оригинальной или переводной англоязычной версии в ссылке должна быть указана именно она, а не русскоязычный вариант.**

Более подробные инструкции по подготовке статей для авторов можно найти на сайте журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Статьи, оформленные не по правилам, будут возвращаться автору на переработку.

Статьи принимаются на географическом факультете в редакции, через сайт журнала и по электронной почте.

Редакция: комната 2108а, тел. +7(495)9392923. Сайт журнала <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/index>. Электронная почта: [vestnik\\_geography@mail.ru](mailto:vestnik_geography@mail.ru).

*Плата за публикацию не взимается*

## **У Ч Р Е Д И Т Е Л И :**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;  
географический факультет МГУ

## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**С.А. ДОБРЮЛОВ**, доктор географических наук, профессор, академик РАН (главный редактор)  
**В.С. ТИКУНОВ**, доктор географических наук, профессор (зам. главного редактора)  
**Е.А. ЕРЕМЕНКО**, кандидат географических наук (ответственный секретарь)  
**А.И. АЛЕКСЕЕВ**, доктор географических наук, профессор  
**С.И. БОЛЫСОВ**, доктор географических наук, профессор  
**А.Н. ГЕННАДИЕВ**, доктор географических наук, профессор  
**К.Н. ДЬЯКОНОВ**, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН  
**С.С. ЗИЛИТИНКЕВИЧ**, доктор географических наук, профессор (Метеорологический институт Финляндии)  
**О.Г. ЗОЛИНА**, профессор (Университет Ж. Фурье, г. Гренобль, Франция)  
**В.Ю. ИВАНОВ**, профессор (Мичиганский университет, США)  
**Н.С. КАСИМОВ**, доктор географических наук, профессор, академик РАН  
**А.В. КИСЛОВ**, доктор географических наук, профессор  
**В.А. КОЛОСОВ**, доктор географических наук, профессор  
**К.П. КОЛТЕРМАНН**, профессор  
**М. КОНЕЧНЫ**, профессор (Университет г. Брно, Чешская Республика)  
**С.Б. КРООНЕНБЕРГ**, профессор (Технологический университет г. Делфт, Нидерланды)  
**С.М. МАЛХАЗОВА**, доктор географических наук, профессор  
**Г. МОУРИ**, профессор (Университет г. Токио, Япония)  
**С.А. СОКРАТОВ**, кандидат географических наук, PhD  
**П.Е. ТАРАСОВ**, доктор наук, профессор (Берлинский Свободный университет, Германия)  
**Н.Л. ФРОЛОВА**, доктор географических наук, профессор  
**В.Е. ШУВАЛОВ**, кандидат географических наук, доцент  
**Т.А. ЯНИНА**, доктор географических наук, профессор  
**В.В. ЯНКО-ХОМБАХ**, доктор геолого-минералогических наук, профессор (Институт прикладных исследований Авалон, г. Виннипег, Канада)

## **EDITORIAL BOARD:**

**S.A. DOBROLUBOV**, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor (Editor-in-chief)  
**V.S. TIKUNOV**, doctor of science, professor (Deputy Editor-in-chief)  
**E.A. EREMENKO**, candidate of science (Secretary-General)  
**A.I. ALEKSEEV**, doctor of science, professor  
**S.I. BOLYSOV**, doctor of science, professor  
**A.N. GENNADIYEV**, doctor of science, professor  
**K.N. D'YAKONOV**, doctor of science, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor  
**S.S. ZILITINKEVICH**, doctor of science, professor (Finnish Meteorological Institute, Finland)  
**O.G. ZOLINA**, professor (Fourier University, Grenoble, France)  
**V.YU. IVANOV**, professor (Michigan University, USA)  
**N.S. KASIMOV**, doctor of science, academician of the Russian Academy of Sciences, professor  
**A.V. KISLOV**, doctor of science, professor  
**V.A. KOLOSOV**, doctor of science, professor  
**K.P. KOLTERMANN**, professor  
**M. KONECNY**, professor (Masaryk University, Faculty of Science, Czech Republic)  
**S.B. KROONENBERG**, professor (Delft University of Technology, Department of Applied Earth Sciences, Netherlands)  
**S.M. MALKHAZOVA**, doctor of science, professor  
**G. MOURI**, professor (University of Tokyo, Japan)  
**S.A. SOKRATOV**, candidate of science, PhD  
**P.E. TARASOV**, professor (Free Berlin University, Germany)  
**N.L. FROLOVA**, doctor of science, professor  
**V.E. SHUVALOV**, candidate of science, associate professor  
**T.A. YANINA**, doctor of science, professor  
**V.V. YANKO-KHOMBACH**, doctor of science, professor (Avalon Institute of Applied Sciences, Winnipeg, Canada)

*Номер подготовили члены редколлегии*  
**Т.А. ЯНИНА, К.Н. ДЬЯКОНОВ**

Редактор **Е.С. Повалишникова**

*Адрес редколлегии:*

119992, Москва, Ленинские горы, МГУ,  
географический факультет, комн. 2108а. Тел. 7(495) 939-29-23

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.  
Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 00.00.2016. Формат 60×90/8.  
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсет. № 1. Офсетная печать. Усл. печ. л.  
Уч.-изд. л. 00. Тираж экз. Изд. № 00000. Заказ №

---

Типография МГУ.  
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 15.