

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Maykop State Technological University»  
Institute of Ecology of the Academy of Sciences of Abkhazia  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tver State University»  
Institute of Atmospheric Physics A.M. Obukhov of the Russian Academy of Sciences  
Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education National Research  
University «Moscow Institute of Electronic Technology»  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Moscow State University named after M.V. Lomonosov»  
Office of Environmental Protection, Natural Resources of the Republic of Adygeya

# **FUNDAMENTAL AND APPLIED ASPECTS OF GEOLOGY, GEOPHYSICS AND GEOECOLOGY USING MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES**

**VI International Scientific and Practical Conference**

Part 1

**Republic of Adygeya, Maykop  
May 17-21, 2021**

УДК [551+550.83+574]:004:061.3(470.621)

ББК 20.1

Ф-94

**Редакционная коллегия:**

Куижева С.К. – д-р экон. наук, доцент

Овсянникова Т.А. – д-р филос. наук, профессор

Беданокон М.К. – д-р экон. наук, профессор

Дёмина Т.И. - канд. физ.-мат. наук, доцент

Шевякова О.П. - канд. физ.-мат. наук, доцент

**Ф-94 ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ГЕОЛОГИИ, ГЕОФИЗИКИ И ГЕОЭКОЛОГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.** Материалы VI Международной научно-практической конференции. Часть 1. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2021. – 200 с.

**ISBN 978-5-907004-75-7**

**ISBN 978-5-907004-76-4 – Ч.1**

В сборнике представлены материалы участников научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий», организованной на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Майкопский государственный технологический университет» совместно с Институтом экологии Академии наук Абхазии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», при поддержке ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, ФГБУН Геофизический центр Российской академии наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» и ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», при участии Управления по охране окружающей среды и природным ресурсам Республики Адыгея, проведённой в г. Майкопе 17 – 21 мая 2021 г.

УДК [551+550.83+574]:004:061.3(470.621)

**ББК 20.1**

© ФГБОУ ВО «МГТУ», 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Алимпиева М.А., Завьялова Е.В., Кузнецова О.Э. СРАВНЕНИЕ РЕЖИМА ОБЛАЧНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЮГО-ЗАПАДЕ И ЮГО-ВОСТОКЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ.....</b>	<b>8</b>
<b>Алимпиева М.А., Морозова С.В., Полянская Е.А. ИЗМЕНЧИВОСТЬ СИНОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛЕТОМ НА ЮГО-ВОСТОКЕ РУССКОЙ РАВНИНЫ.....</b>	<b>14</b>
<b>Андреев Т.И., Рафикова Ю.Ю., Тетерина Н.В. О СОЗДАНИИ БАЗЫ ГЕОДАНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ БИОЭНЕРГЕТИКИ СРЕДСТВАМИ ГИС.....</b>	<b>20</b>
<b>Артамонова А.В., Козлов И.Е. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРЕЙ В НОРВЕЖСКОМ И ГРЕНЛАНДСКОМ МОРЯХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В 2007 ГОДУ.....</b>	<b>25</b>
<b>Ахсалба А.К., Марандиди С.И. ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И КИСЛОРОДА В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ.....</b>	<b>31</b>
<b>Бахова Н.И. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КАРПАТСКОМ РЕГИОНЕ.....</b>	<b>39</b>
<b>Бучацкий П.Ю., Мугу А.А. ОБЗОР ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ....</b>	<b>49</b>
<b>Варенцов М.И., Репина И.А., Артамонов А.Ю., Константинов П.И., Степаненко В.М., Шестакова А.А., Локощенко М.А., Соромотин А.В., Печкин А.С. ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРОКОПТЕРОВ.....</b>	<b>54</b>
<b>Гицба Я.В., Экба Я.А. ВЛИЯНИЕ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УРОВЕНЬ ЧЁРНОГО МОРЯ В АКВАТОРИИ СУХУМСКОЙ БУХТЫ.....</b>	<b>60</b>
<b>Грабенко Е.А., Иванов М.М., Кузьменкова Н.В., Грачев А.А., Голосов В.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОСОВ НА ВЫСОКОГОРНЫХ ЛУГАХ КАВКАЗА.....</b>	<b>65</b>
<b>Гудкова Н.К. О ФАКТОРАХ И ПРОБЛЕМАХ АКТИВИЗАЦИИ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СОЧИНСКОМ РЕГИОНЕ.....</b>	<b>75</b>
<b>Дашян С., Кутоянц Ю.А., Фаринетто К., Чернояров О.В. ОБ ОЦЕНКЕ ВРЕМЕНИ НАЧАЛА ИЗЛУЧЕНИЯ И КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА СИГНАЛОВ НА ПЛОСКОСТИ.....</b>	<b>77</b>
<b>Довгаль В.А., Куижева С.К. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....</b>	<b>86</b>

<b>Дубыкин В.П., Макаров А.А., Чернояров О.В. СТРУКТУРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗАДЕРЖКАМ ИЗЛУЧАЕМЫХ ИМИ СИГНАЛОВ.....</b>	<b>95</b>
<b>Жданова Е.Ю. ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ АРКТИЧЕСКИХ ОСТРОВОВ.....</b>	<b>102</b>
<b>Жук Е.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ДОСТУПА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО ЧЁРНОМУ МОРЮ....</b>	<b>108</b>
<b>Кажукало Г.А., Еременко Е.А. ВЛИЯНИЕ ТИПОВ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА СПЕКТР АНТРОПОГЕННЫХ ТРАНСФОРМАЦИЙ РЕЛЬЕФА (НА ПРИМЕРЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ).....</b>	<b>113</b>
<b>Кожевников В.Н., Беданок М.К., Берзегова Р.Б. ИССЛЕДОВАНИЕ РОТОРНЫХ ЗОН ПРИ ОБТЕКАНИИ ГОР СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА.....</b>	<b>120</b>
<b>Козлов И.Е., Зубкова Е.В., Плотников Е.В., Артамонова А.В., Михайличенко Т.В. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВЕРХНЕГО СЛОЯ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ПО ДАННЫМ СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>128</b>
<b>Коночкин К.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОПРАВКИ НА СОСТОЯНИЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ.....</b>	<b>130</b>
<b>Королев Р.Ю., Лебедев С.А. МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ БРАУНА .....</b>	<b>135</b>
<b>Корчагина Е.А. СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ГОРНЫХ РАЙОНАХ РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН.....</b>	<b>139</b>
<b>Костяная Е.А., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Серых И.В. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ И РЕГИОНАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ИНФРАСТРУКТУРУ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ .....</b>	<b>148</b>
<b>Костяной А.Г., Костяная Е.А., Лебедев С.А., Серых И.В., Прокофьев Я.А. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ.....</b>	<b>158</b>
<b>Курбатова И.Е. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА РЕЧНОГО БАСЕЙНА КАК МЕТОД ОЗДОРОВЛЕНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ.....</b>	<b>168</b>
<b>Кюль Е.В., Кондратьева Н.В., Гедуева М.М., Джаппуев Д.Р. МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В БАСЕЙНЕ РЕКИ БЕЛАЯ.....</b>	<b>179</b>



<b>Лебедев С.А., Костяной А.Г., Костяная Е.А., Серых И.В.</b> <b>МЕЖГОДОВАЯ И СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОСНОВНЫХ</b> <b>ГИДРОМЕТЕРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ</b> <b>БЕЛОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ</b> <b>АЛЬТИМЕТРИИ.....</b>	<b>189</b>
---	------------

## CONTENTS

<b>Alimpieva M., Zavyalova E., Kuznetsova O.</b> COMPARISON OF CLOUDINESS AND TEMPERATURE IN THE SOUTHWEST AND SOUTHEAST OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA.....	<b>8</b>
<b>Alimpieva M., Morozova S., Polyanskaya E.</b> VARIABILITY OF SYNOPTIC PROCESSES IN SUMMER IN THE SOUTHEAST OF THE RUSSIAN PLAIN.....	<b>14</b>
<b>Andreenko T., Rafikova Yu., Teterina N.</b> ABOUT CREATION OF THE GEODATA DATABASE WITH THE CLOSED-LOOP TIMBER INDUSTRY COMPLEX COMPANIES FOR ASSESSMENT OF BIOENERGY DEVELOPMENT PROSPECTS BY MEANS OF GIS.....	<b>20</b>
<b>Artamonova A., Kozlov I.</b> CHARACTERISTICS OF OCEAN EDDIES IN THE NORWEGIAN AND GREENLAND SEAS FROM SPACEBORNE RADAR OBSERVATION IN 2007.....	<b>25</b>
<b>Akhsalba A., Marandidi S.</b> DYNAMICS OF THE CONTENT OF CARBON DIOXIDE AND OXYGEN IN THE COASTAL WATERS OF THE BLACK SEA.....	<b>31</b>
<b>Bakhova N.</b> MATHEMATICAL MODEL OF THERMOELASTIC STRESSES IN CARPATHIAN REGION.....	<b>39</b>
<b>Buchatskiy P., Mugu A.</b> FUEL CELL OVERVIEW.....	<b>49</b>
<b>Varentsov M., Repina I., Artamonov A., Konstantinov P., Stepanenko V., Shestakova A., Lokoshchenko M., Soromotin A., Pechkin A.</b> EXPERIENCE IN ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER RESEARCH AND USING QUADCOPTERS.....	<b>54</b>
<b>Gitsba Ya., Ekba Ya.</b> INFLUENCE OF HYDROTHERMAL FACTORS ON THE BLACK SEA LEVEL IN THE WATER AREA OF SUKHUM.....	<b>60</b>
<b>Grabenko E., Ivanov M., Kuzmenkova N., Grachev A., Golosov V.</b> APPLICATION OF THE ANTHROPOGENIC FALLOUT RADIONUCLIDES FOR EVALUATION OF SEDIMENT REDISTRIBUTION IN ALPINE GRASSLANDS OF CAUCASUS...	<b>65</b>
<b>Gudkova N.</b> ON FACTORS AND PROBLEMS OF ACTIVATION OF DANGEROUS GEOLOGICAL PROCESSES IN THE SOCHINSK REGION.....	<b>75</b>
<b>Dachian S., Kutoyants Yu., Farinnetto C., Chernoyarov O.</b> ON THE ESTIMATION OF THE TIME OF THE EMISSION STARTING AND THE COORDINATES OF THE SIGNAL SOURCE ON THE PLANE.....	<b>77</b>
<b>Dovgal V., Kuizheva S.</b> USING BIG DATA TECHNOLOGY TO PROTECT THE ENVIRONMENT.....	<b>86</b>

<b>Dubykin V., Makarov A., Chernoyarov O.</b> THE STRUCTURE AND THE CHARACTERISTICS OF THE OPTIMAL ALGORITHM FOR DETERMINING THE OBJECT COORDINATES BY THE MEASURED DELAYS OF THE SIGNALS THAT THEY EMIT.....	95
<b>Zhdanova E.</b> HYDROMETEOROLOGICAL FACTORS OF CHANGES IN THE COASTLINE OF ARCTIC ISLANDS.....	102
<b>Zhuk E.</b> THE USING OF GIS TECHNOLOGIES TO ACCESS AND VISUALIZE THE BLACK SEA OCEANOGRAPHIC DATA.....	108
<b>Kazhukalo G., Eremenko E.</b> THE CORRELATION BETWEEN THE TYPE OF LAND-USE AND ANTHROPOGENIC TRANSFORMATIONS OF THE RELIEF (ON THE EXAMPLE OF THE RUSSIAN ARCTIC).....	113
<b>Kozhevnikov V., Bedanokov M., Berzegova R.</b> RESEARCH OF ROTARY ZONES IN THE FLOW AROUND THE MOUNTAINS OF THE NORTH-WEST CAUCASUS.....	120
<b>Kozlov I., Zubkova E., Plotnikov E., Artamonova A., Mikhailichenko T.</b> DYNAMIC PROCESSES IN THE ARCTIC OCEAN FROM CONTEMPORARY SATELLITE OBSERVATIONS.....	128
<b>Konochkin K.</b> REPORT: USING A NEURAL NETWORK FOR APPROXIMATION OF PARAMETRICAL ESTIMATION OF THE SEA STATE BIAS.....	130
<b>Korolev R., Lebedev S.</b> THE LEAST SQUARES METHOD FOR FINDING THE PARAMETERS OF THE BROWN ALGORITHM...	135
<b>Korchagina E.</b> MODERN CHANGES IN THE REGIME OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION AND AIR TEMPERATURE IN THE MOUNTAINOUS REGIONS OF THE DAGESTAN REPUBLIC.....	139
<b>Kostianaia E., Kostianoy A., Lebedev S., Serykh I.</b> IMPACT OF EXTREME WEATHER CONDITIONS AND REGIONAL CLIMATE CHANGE ON RAILWAY INFRASTRUCTURE.....	148
<b>Kostianoy A., Kostianaia E., Lebedev S., Serykh I., Prokofiev Ya.</b> INTERANNUAL VARIABILITY IN THE LEVEL OF LAKES IN NORTHWESTERN RUSSIA.....	158
<b>Kurbatova I.E.</b> RESTORATION OF THE ECOLOGICAL FRAMEWORK OF THE RIVER BASIN AS THE METHOD FOR WATER ECOSYSTEM RECOVERY.....	168
<b>Kyul E., Kondratieva N., Gedueva M., Dzhappuev D.</b> MONITORING OF HAZARDOUS NATURAL PROCESSES IN THE BELAYA RIVER BASIN.....	179
<b>Lebedev S., Kostianoy A., Kostianaia E., Serykh I.</b> INTERANNUAL AND SEASONAL VARIABILITY OF THE MAIN HYDROMETEOROLOGICAL PARAMETERS OF THE WHITE SEA STATE BASE ON SATELLITE ALTIMETRY DATA.....	189

# СРАВНЕНИЕ РЕЖИМА ОБЛАЧНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЮГО-ЗАПАДЕ И ЮГО-ВОСТОКЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

М.А. Алимпиева, Е.В. Завьялова, О.Э. Кузнецова

*alimpiewa@rambler.ru*

*Саратовский национальный исследовательский университет  
им. Н.Г. Чернышевского, Россия, г. Саратов*

***Аннотация.** Рассматривается ход температуры и облачности в различных по климатическим условиям районах по данным метеостанций Грозный и Саратов. Выявлено отсутствие потепления на Северном Кавказе. Анализ временных рядов температуры и облачности методом интегрально-разностных кривых позволило выявить цикличность в изменении этих двух характеристик в Нижнем Поволжье и отсутствие цикличности в их ходе на Северном Кавказе.*

***Ключевые слова.** Годовой ход облачности, климатические изменения температуры.*

Согласно современным климатическим тенденциям, происходят определенные изменения в земной климатической системе. Наиболее ярко климатические изменения проявляются в изменениях приповерхностной температуры воздуха. Действительно, температура является важнейшей климатической характеристикой. Однако, помимо температуры воздуха, другой важнейшей характеристикой климата являются атмосферные осадки. Укажем, что, если в изменениях температуры воздуха имеется определенная ясность, то в тенденции изменения атмосферных осадков на фоне климатической изменчивости имеется очень большая неопределенность [2, 13].

Как известно, осадки выпадают из облаков, поэтому исследование изменения облачного покрова в различные периоды климатической изменчивости представляет определенный интерес. Значимость изучения состояния облачного покрова еще определяется тем обстоятельством, что облачность является тем метеорологическим элементом, роль которого в настоящих климатических изменениях не определена.

Целью настоящей работы является сравнение режима облачности на юго-западе и юго-востоке Русской равнины. Укажем, что подобные исследования уже проводились коллективом авторов и выполнялись для различных регионов – Нижнего Поволжья, Центральной России, Южного Предуралья, Среднего Предуралья, Северо-Запада ЕЧР [4 – 7, 12]. Оказывается, весьма интересным провести подобное исследование для горной территории. Отметим, что аналогичные исследования, выполненные для горных территорий со специфическим климатом, практически отсутствуют. Поскольку образование облаков зависит от влагосодержания воздуха, что, в свою очередь, определяется температурным режимом, то в настоящей статье представлены результаты комплексного анализа этих двух характеристик.

Режим температуры и облачности на юго-западе ЕЧР исследовался по данным метеостанции г. Грозного. Режим температуры и облачности на юго-востоке ЕЧР рассматривался по данным метеостанции Саратов Юго-Восток. Исходные материалы для исследования взяты с сайта ВНИИГМИ-МЦД [1]. Выбирались данные о средних месячных температурах, а также данные по общей облачности в метеорологические сроки. Далее рассчитывалось среднее месячное и среднее годовое количество облаков. К сожалению, на сайте надежные данные по температуре и облачности по метеостанции г. Грозного имеются только с 1966 по 1993 годы. Поэтому по метеостанции Саратов для анализа взят такой же интервал. Этот интервал охватывает два естественных климатических периода состояния земной климатической системы – стабилизацию и вторую волну глобального потепления. Выделение естественных климатических периодов проведено С.В. Морозовой [8].

На рис. 1 представлено изменение температуры воздуха за исследуемый ряд лет по двум метеостанциям. Как видно из рисунка, на выбранном временном интервале по метеостанции Саратов средние годовые температуры воздуха увеличиваются ( $\alpha = 0,027$ ). По метеостанции Грозный средние годовые температуры, наоборот, уменьшаются ( $\alpha = - 0,024$ ) примерно с такой же скоростью, с которой происходит их рост в Нижнем Поволжье. Таким образом, можно заключить, что в районе Северного Кавказа с середины шестидесятых годов по начало девяностых средние годовые температуры понижались, что свидетельствует об отсутствии потепления в этой части России. Выявленное отсутствие потепления на Северном Кавказе можно рассматривать как региональную особенность этой территории.

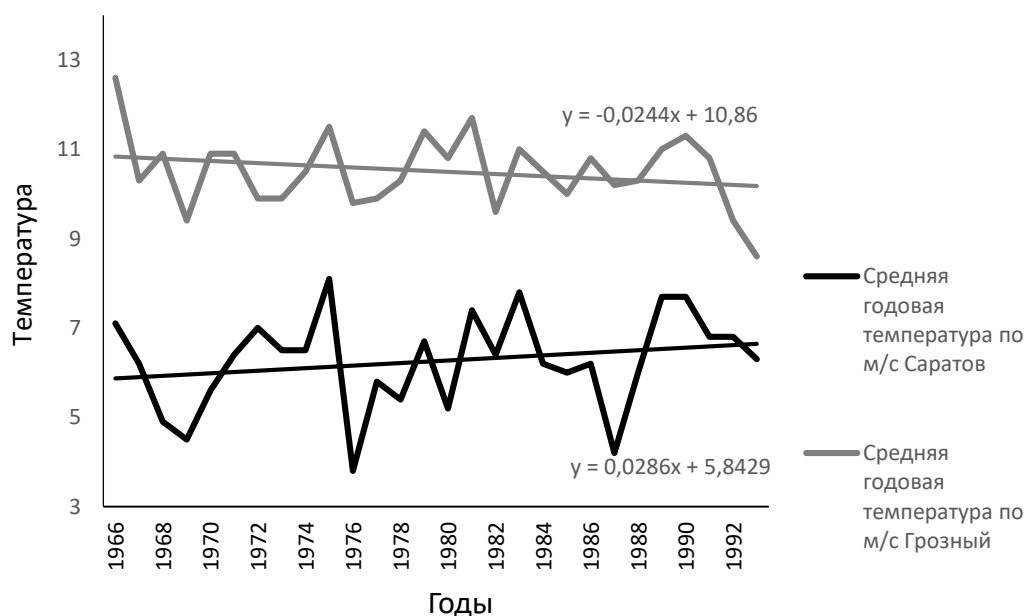


Рис. 1. Изменение средней годовой температуры воздуха по метеостанциям Саратов и Грозный

Рассмотрим изменение общего количества облаков на этом временном интервале (рис. 2). Как видно из рис. 2, временное изменение общего

количества облаков противоположно изменению температуры воздуха, что является отражением физической связи температура – облачность. Таким образом, на фоне снижения температуры воздуха на Северном Кавказе наблюдается и снижение балла общей облачности ( $\alpha = -0,012$ ). В Нижнем Поволжье на фоне роста температур наблюдается тенденция некоторого увеличения балла общей облачности, но эта тенденция очень слаба. Вполне возможно, что замеченный очень слабый рост среднего балла общей облачности связан с сухостью климата Нижнего Поволжья. Укажем, что впоследствии изменения облачного покрова в Нижнем Поволжье следует рассмотреть дифференцированно по сезонам года.

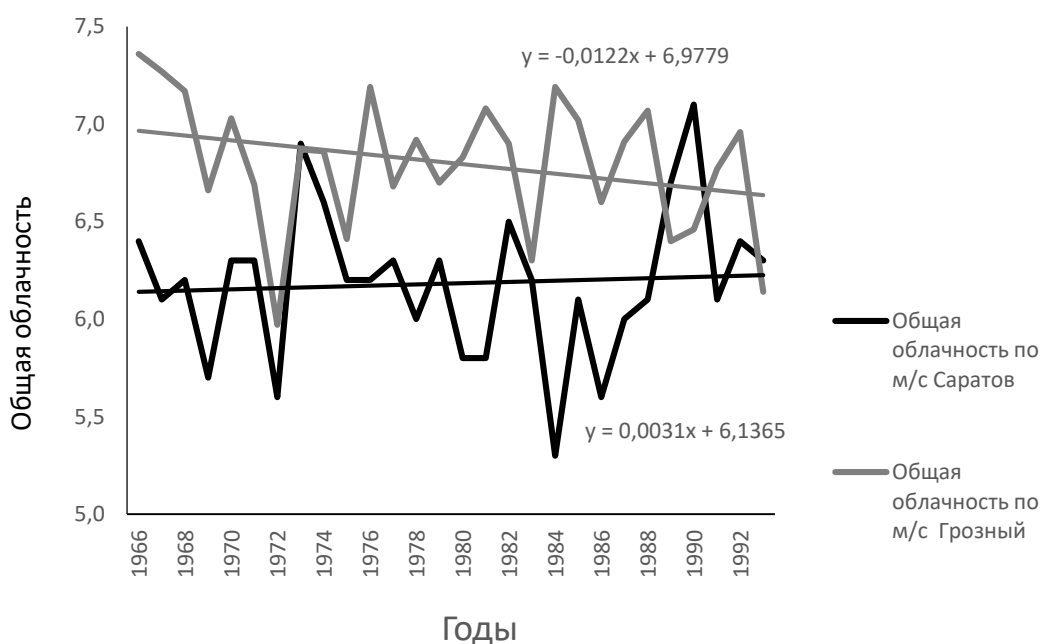


Рис. 2. Изменение средней годовой облачности по метеостанциям Саратов и Грозный

Для того, чтобы дать комплексный анализ изменения средних годовых температур и среднего годового балла общей облачности на фоне наблюдаемых климатических тенденций, применим к временным рядам температуры и облачности метод интегрально-разностных кривых [3]. Этот метод позволяет выделять периоды с преобладанием положительных аномалий метеовеличин и периоды с преобладанием их отрицательных аномалий.

На рис. 3 представлены интегрально разностные кривые по температуре и общей облачности по метеостанции Саратов. Как видно из рисунка, в ходе приземной температуры воздуха выделяются три циклических колебания с примерно одинаковыми периодами. Первое циклическое колебание (1966 – 1974 гг.) в ходе температуры приходится на климатический период стабилизации. Два других цикла соответствуют второй волне глобального потепления, причем первой ее фазе, когда потепление развивалось наиболее активно. Укажем, что цикличность изменения температуры на фоне второй волны глобального потепления, по-видимому, объясняется тем, что в Нижнем Поволжье начало второй волны глобального потепления оказалось сдвинутым

относительно ее развития на полушарии. Сдвиг составил около десяти лет. Если на Северном полушарии потепление началось с середины 70-х годов [2, 13], то в Нижнем Поволжье вторая волна потепления начала развиваться с середины 80-х годов [9 – 11, 14, 15].



Рис. 3. Интегрально-разностные кривые изменения среднегодовой температуры воздуха и облачности по метеостанции Саратов Юго-Восток

Во временном ходе облачности выделяется одно циклическое колебание, максимальная фаза которого приходится на период начала второй волны глобального потепления на полушарии. Когда в Нижнем Поволжье стало наблюдаться потепление, во временном ходе облачности стали преобладать отрицательные аномалии температуры.

Отметим еще одну особенность климатической связи облачность – температура. С семидесятых по середину восьмидесятых годов наблюдается рассогласованность в ходе кривых, в то время как в период стабилизации в начале девяностых годов XX века кривые хорошо согласуются. Можно предположить, что такой ход временных кривых облачность – температура является отражением внутренних нелинейных взаимодействий между компонентами земной климатической системы, реализуемых посредством обратных связей.

Аналогичные графики построены по метеостанции Грозный (рис. 4). В данном случае анализ временных рядов методом интегрально-разностных кривых не выявил циклических колебаний ни в изменениях температуры, ни в изменении облачности. Эти кривые располагаются примерно параллельно одна другой. Это свидетельствует об отсутствии климатических колебаний в данном регионе.

Таким образом, проведенное исследование позволило выявить особенности изменения температуры и облачности в Северо-Кавказском регионе на фоне глобальных климатических тенденций. Данные о температуре по метеостанции г. Грозный позволило констатировать отсутствие потепления в этом регионе.

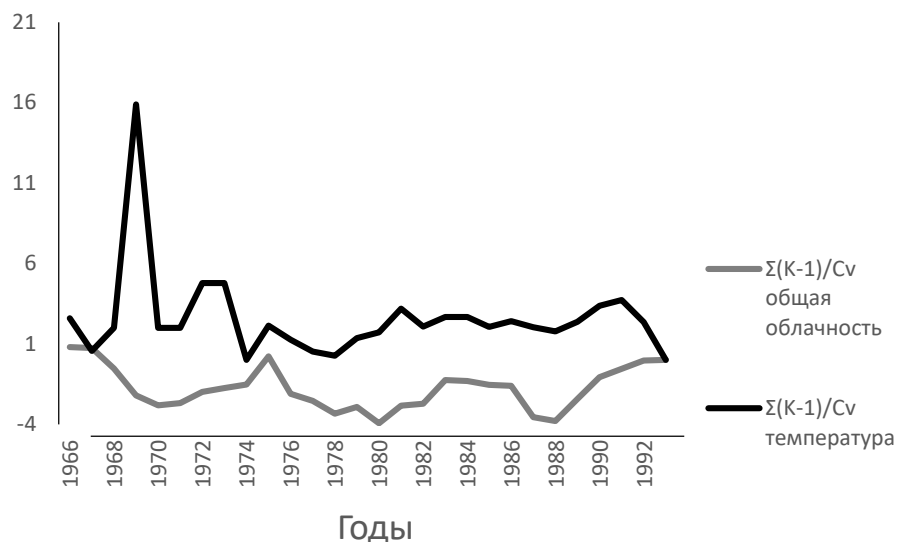


Рис. 4. Интегрально-разностные кривые изменения среднегодовой температуры воздуха и облачности по метеостанции Грозный

### Список литературы

1. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой Центр Данных. [Электронный ресурс]: данные о температуре и облачности (URL.:<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>)
2. Второй Оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Изд-во ЗАО «Группа море». 2014. 60 с.
3. Дроздов, О.А. О свойствах интегрально-разностных кривых / О.А. Дроздов // Труды ГГО – Л.: Гидрометеиздат, 1964. - Вып. 162. - С. 3-6.
4. Завьялова Е.В., Морозова С.В. Исследование годового хода температуры и общей облачности по м/с Пермь и Оренбург // Цифровая география: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. - Пермь, 2020. – Т.2. – С. 370-373.
5. Завьялова Е.В. Морозова С.В., Кононова Н.К., Полянская Е.А. Сравнительная характеристика годового хода температуры и общей облачности // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий: Материалы II Международной научно-практической конференции, посвященной 175-летию Русского географического общества и 100-летию со дня рождения челябинского географа А.Я. Румянцевой. - Челябинск, 2020. С. 10-15.
6. Левицкая Н.Г., Морозова С.В., Орлова И.А. Климатические изменения в Нижневолжском регионе на фоне глобального потепления (на примере Саратова) Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Т.13. Серия Науки о Земле. Вып.1. 2013. С.45 -50.
7. Морозова С.В. О возможной роли облачности в настоящих климатических изменениях // Труды ГГО. Вып. 586. 2017. С.251-260.
8. Морозова С.В. Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных климатических процессах / С.В. Морозова. - Саратов: изд-во Саратов. ун-та, 2019. - 132 с.
9. Морозова С.В., Полянская Е.А., Иванова Г.Ф., Левицкая Н.Г., Денисов К.Е., Молчанова Н.П. Особенности проявления глобальных климатических тенденций на юго-востоке Русской равнины на основе комплексного анализа метеовеличин. // Труды III Международной научной конференции «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: Экологические вызовы XXI века». Казань, КФУ, 27 – 29 сентября 2017 г. Казань: Изд-во АН РТ, 2017. С.217-219.
10. Морозова С.В., Полянская Е.А., Иванова Г.Ф., Левицкая Н.Г., Денисов К.Е., Молчанова Н.П. Изменчивость циркуляционных процессов в Нижнем Поволжье на фоне



глобальных климатических тенденций. // Труды III Международной научной конференции «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: Экологические вызовы XXI века». Казань, КФУ, 27 – 29 сентября 2017 г. Казань: Изд-во АН РТ, 2017. С.215-217.

11. Морозова С.В., Полянская Е.А., Кононова Н.К., Летучий А. В., Молчанова Н.П. Особенности проявления глобальных климатических тенденций на юго-востоке Русской равнины. // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти чл.-корр. РАН А.Н. Антипова «Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования». Иркутск, Институт географии им. В.Б. Сочавы, 23–27 сентября 2019 г. – Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2019. С. 181-186.

12. Морозова С.В., Завьялова Е.В. Сравнительная характеристика годового хода облачности и температуры по м/с Саратов, Москва и Санкт-Петербург //Агрометеорология XXI века, часть 2: материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию Ю.И. Чиркова, г. Москва, 26 ноября 2019 г., сборник статей. Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева. - Москва: Издательство РГАУ – МСХА, 2019. С. 205-210. ISBN 978-5-9675-1737-2

13. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2013: The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

14. S V Morozova, E A Polyanskaya, G F Ivanova, N G Levitskaya, K E Denisov, N P Molchanova. Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the background of global climate trends // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). Volume 107. 2018.

15. S V Morozova, E A Polyanskaya, N K Kononova, N P Molchanova and AP Solodovnikov Peculiarities of the global climate tendencies in the south-east Russian plains // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 381. 2019. <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/381/1>

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ СИНОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛЕТОМ НА ЮГО-ВОСТОКЕ РУССКОЙ РАВНИНЫ

М.А. Алимпиева, С.В. Морозова, Е.А. Полянская

*alimpiewa@rambler.ru; swetwl@yandex.ru*

*Саратовский национальный исследовательский университет  
им. Н.Г. Чернышевского, Россия, г. Саратов*

***Аннотация.** Рассматривается повторяемость синоптических процессов в Нижнем Поволжье в два естественных климатических периода состояния земной климатической системы – стабилизацию и вторую волну глобального потепления. Отмечаются пространственно-временные различия развития синоптических процессов над Нижней Волгой. Указывается на возрастание роли летних сезонов в наблюдаемом росте температур воздуха.*

Климатические изменения, наблюдающиеся глобально на всем земном шаре, очевидны и трактуются как глобальное потепление. Начало этого процесса относят на конец XIX века [2, 12]. Именно с этого времени фиксируется неуклонный рост приповерхностной температуры воздуха. Укажем, что на фоне прогрессивного роста температур выделяются и периоды ее понижения, например, период стабилизации, имевший место в пятидесятые – шестидесятые годы XX века. Период с конца XIX века по сороковые годы XX века принято называть первой волной глобального потепления. Временной интервал с середины семидесятых годов XX века по настоящее время принято называть второй волной глобального потепления. Оценка статистической значимости изменения приповерхностной температуры воздуха в различные климатические промежутки проведена С.В. Морозовой [7, 13]. Она же предложила называть эти климатические промежутки естественными климатическими периодами состояния земной климатической системы (ЗКС) [7, 13].

Отметим, что вторая волна глобального потепления характеризуется наибольшей скоростью роста приповерхностной температуры воздуха. В связи с этим в публикациях, например, в [8] указывается, что к наблюдаемому с середины семидесятых годов в земной климатической системе процессу вполне правомерно применять термин «разгоняющееся потепление».

Однако, на фоне глобального роста температур в отдельных регионах имеются свои отличия. Например, в Нижнем Поволжье (юго-восток Русской равнины) вторая волна глобального потепления начала развиваться несколько позднее, чем в целом на полушарии. Прогрессивный рост температур в регионе зафиксирован с середины восьмидесятых годов XX века, то есть почти на десять лет позже, чем в целом по полушарию [13].

Есть еще одна региональная особенность проявления второй волны глобального потепления в Нижнем Поволжье. Она связана с тем, что в этот естественный климатический период рост летних температур оказался несколько выше роста зимних. Обычно при потеплении наибольшая скорость

роста отмечается у температур зимних сезонов [4 – 6, 10]. Данный вывод подтвержден не только анализом приземных температур воздуха, но и барикоциркуляционными условиями, складывающимися над регионом в средней тропосфере [4 – 6, 10].

Укажем, что региональные климатические особенности формируются под влиянием протекающих над ним синоптических процессов. Поэтому представляется весьма интересным рассмотреть изменчивость синоптических процессов над Нижним Поволжьем в различные естественные климатические периоды. Поскольку регулярно синоптические карты составляются с конца сороковых годов XX века, то для настоящего исследования взяты период стабилизации и вторая волна глобального потепления.

Климатическое обобщение синоптического материала можно проводить разными способами. Первый способ - построение средних многолетних карт. Укажем, что при таком способе возможен анализ только среднего поля, и посредством такого анализа вычлнить роль каждого процесса невозможно. Другой способ – проведение дифференцированного анализа синоптического материала. При таком способе анализа выделяются две разновидности – метод эталонов и методика типизаций (классификаций). Укажем, что метод эталонов позволяет выделить один или два типа процессов и не позволяет выделять остальные, реже встречающиеся разновидности барических полей [7].

Поскольку задачей исследования стало проведение дифференцированный анализ, то для климатического обобщения синоптического материала выбран прием типизации синоптических процессов и частоты проявления процессов каждого типа в различные естественные климатические периоды состояния ЗКС.

Поскольку замечена интересная тенденция, касающаяся скорости роста летних температур, рассмотрим повторяемость синоптических процессов в летний сезон в четырех пунктах – Самаре, Саратове, Волгограде и Астрахани. Тип синоптического процесса определялся согласно классификации В.Л.Архангельского – Е.А.Полянской [1, 11]. Согласно их исследованиям, в Нижнем Поволжье выделяются следующие типы синоптических процессов:

- I. Циклоническая деятельность на арктическом фронте.
- II. Воздействие арктического антициклона.
- III. Воздействие зимнего азиатского антициклона.
- IV. Воздействие субтропического антициклона.
- V. Малоградиентные поля повышенного и пониженного давления.
- VI. Циклоническая деятельность на полярном фронте.
- VII. Деформационное поле.

В табл. 1 представлена повторяемость синоптических процессов летом в четырех пунктах в два естественных климатических периода – стабилизацию (СТ) и вторую волну глобального потепления (ВТП). Укажем, что в табл. 1 не приводится повторяемость III типа процессов, так как зимний азиатский антициклон летом не существует.

## Повторяемость (среднее число дней) различных типов синоптических процессов летом

Тип процесса	Период	Пункт			
		Самара	Саратов	Волгоград	Астрахань
I	СТ	14,4	11,4	7,6	5,0
	ВТП	18,6	22,0	14,2	9,2
II	СТ	15,3	13,5	11,2	10,3
	ВТП	30,0	26,8	27,3	26,2
IV	СТ	16,9	20,0	23,5	26,2
	ВТП	10,7	10,5	14,1	17,8
V	СТ	11,4	11,9	11,4	13,1
	ВТП	20,6	18,6	22,9	28,7
VI	СТ	29,5	30,8	34,2	30,0
	ВТП	9,0	9,5	11,5	7,5
VII	СТ	1,2	4,4	3,9	1,5
	ВТП	4,8	3,3	3,9	4,9

Как видно из табл.1, в период стабилизации от Самары в Астрахани уменьшается повторяемость циклонов, развитых на арктическом фронте, в этом же направлении уменьшается число арктических вторжений в их тылу. А вот повторяемость субтропических антициклонов и полярнофронтальных антициклонов с севера на юг (от Самары до Астрахани) снижается. Повторяемость малоградиентных полей во всех пунктах примерно одинакова, а вот под влиянием деформационных полей чаще всего оказываются Саратов и Волгоград, реже всего они наблюдаются в Самаре и Астрахани.

Во вторую волну глобального потепления, при возмущенном состоянии атмосферной циркуляции территориальное распределение повторяемости выделенных типов синоптических процессов. Так повторяемость арктическофронтальных циклонов оказывается наибольшей в Саратове, южнее, в Волгоград и Астрахань, они проникают намного реже. В связи с этим повторяемость арктических ядер максимальной оказывается в Самаре, во всех остальных пунктах летом число их воздействий примерно одинаково. Во вторую волну глобального потепления замечена интересная особенность воздействий отрогов субтропических антициклонов на Нижнее Поволжье. На Самару и Саратов восточный отрог субтропического максимума воздействует с одинаковой повторяемостью, далее к югу (от Волгограда к Астрахани) частота воздействия этого типа синоптического процесса возрастает. От Самары к Астрахани возрастает повторяемость деформационных полей. Отметим, что во вторую волну глобального потепления наиболее часто полярнофронтальные циклоны фиксируются в п.Волгоград, частота их воздействия в Самаре и Саратове одинакова, и наименьшая повторяемость этого типа синоптического процесса (VI тип) отмечается в Астрахани. Во вторую волну глобального потепления наиболее часто деформационные поля присутствуют над Самарой и Астраханью, и реже – в Саратове и Волгограде. Заметим, что воздействие на Нижнее Поволжье деформационных полей во вторую волну глобального потепления обнаруживает полностью противоположную тенденцию воздействия. Этот факт также оказывается

интересным и не соответствует климатической характеристике распределения этой формы циркуляции.

Укажем, что летняя (сезонная) повторяемость синоптических процессов складывается из их повторяемости в летние месяцы. В табл. 2 приведена повторяемость синоптических процессов по четырем пунктам в три летних месяца в два рассматриваемых естественных синоптических периода.

Таблица 2

Повторяемость основных типов синоптических процессов в летние месяцы  
(июнь, июль, август)

Тип процесса	Период	Пункт											
		Самара			Саратов			Волгоград			Астрахань		
		VI	VII	VIII	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII
I	СТ	6,1	4,1	4,2	5,0	3,4	3,0	3,3	2,1	2,1	2,0	1,5	1,5
	ВТП	8,7	5,0	4,9	10,4	5,9	5,7	6,5	3,8	3,9	3,8	2,9	2,5
II	СТ	4,3	4,1	6,9	3,8	3,5	6,2	3,1	3,1	5,0	2,9	2,8	4,6
	ВТП	8,5	11,2	10,3	6,5	8,6	11,7	7,3	10,1	9,9	7,3	9,0	9,9
IV	СТ	6,3	6,4	4,2	7,4	7,4	5,2	8,3	8,6	6,0	8,9	9,7	7,6
	ВТП	3,6	3,3	3,8	3,3	3,6	3,6	4,2	4,6	5,3	6,5	5,6	5,7
V	СТ	3,5	4,4	3,5	3,9	4,6	3,4	3,7	4,3	3,4	4,1	4,9	4,1
	ВТП	7,8	7,8	5,0	7,1	6,5	5,0	7,7	8,1	7,1	10,0	9,6	9,1
VI	СТ	8,4	10,5	10,6	8,4	10,8	11,5	10,4	11,4	12,4	9,4	10,0	10,6
	ВТП	3,0	3,0	3,0	2,5	2,8	4,2	3,0	4,1	4,4	2,6	2,8	2,1
VII	СТ	0,0	0,2	1,0	1,4	1,3	1,7	1,3	1,4	1,2	0,2	0,5	0,8
	ВТП	1,4	1,6	1,8	0,2	1,3	1,8	1,3	1,4	1,2	1,6	1,7	1,6

Выявленные особенности территориального распределения повторяемости синоптических процессов в Нижнем Поволжье, проявившиеся во вторую волну глобального потепления, могут указывать на активные перестроечные процессы в атмосфере, происходящие во вторую волну глобального потепления. Перестройка атмосферной циркуляции замечена и другими авторами, применявшие другие методы исследования [2, 3].

Рассмотрим изменение синоптических процессов в Нижнем Поволжье в два естественных климатических периода – стабилизацию и вторую волну глобального потепления.

Сразу можно отметить тенденцию, характерную для всех пунктов. Во вторую волну глобального потепления по сравнению с периодом стабилизации возросла повторяемость циклонов, развитых на арктическом фронте. В то же время соответственно увеличивается повторяемость вторжения в регион арктических ядер (II тип процесса). Как правило, это заключительные антициклоны циклонической серии. В то же время летом во вторую волну глобального потепления по сравнению с периодом стабилизации Нижнее Поволжье оказывается реже под влиянием субтропических антициклонов. Отметим, что во вторую волну глобального потепления циклоны, развитые на полярном фронте, выходят на регион почти в три раза реже, чем в период стабилизации. Также укажем, что во вторую волну глобального потепления по сравнению с периодом стабилизации в Нижнем Поволжье почти в два раза возросла повторяемость малоградиентных полей. Определенной тенденции изменения повторяемости деформационных

полей в два исследуемых естественных синоптических периода не обнаружено.

Отметим, что замеченная особенность увеличения повторяемости вторжения арктических ядер в Нижнее Поволжье во вторую волну глобального потепления указывает на повышение роли трансформационных процессов в регионе. Согласно исследованиям В.Л. Архангельского [1], Е.А. Полянской [11], С.В. Морозовой [8] вторжения сухого холодного арктического воздуха в Нижнее Поволжье летом приводят к особо жестоким и продолжительным засухам.

Такая особенность атмосферной циркуляции нашла выражение в барическом поле на среднем уровне тропосферы. Для убедительности приведем авторские рисунки из публикаций [9, 11]. На рис. 1 приведено среднее барическое поле АТ-500 гПа во вторую волну глобального потепления в июле – центральном месяце летнего сезона. На рис. 1а хорошо выражен климатический барический гребень над южной частью Восточно-Европейской равнины. Климатическое присутствие барического гребня указывает на преобладание блокирующих процессов в этом регионе, в том числе, и в Поволжье. На рис. 1б видно замкнутую область положительных аномалий геопотенциальных высот над Средней и Нижней Волгой, что также указывает на повышенную частоту блокирующих процессов в регионе во вторую волну глобального потепления, чем в период стабилизации. Отметим, что в период стабилизации над регионом присутствовала климатическая барическая ложбина, указывающая на преобладание циклонических процессов над антициклоническими в Поволжье летом.

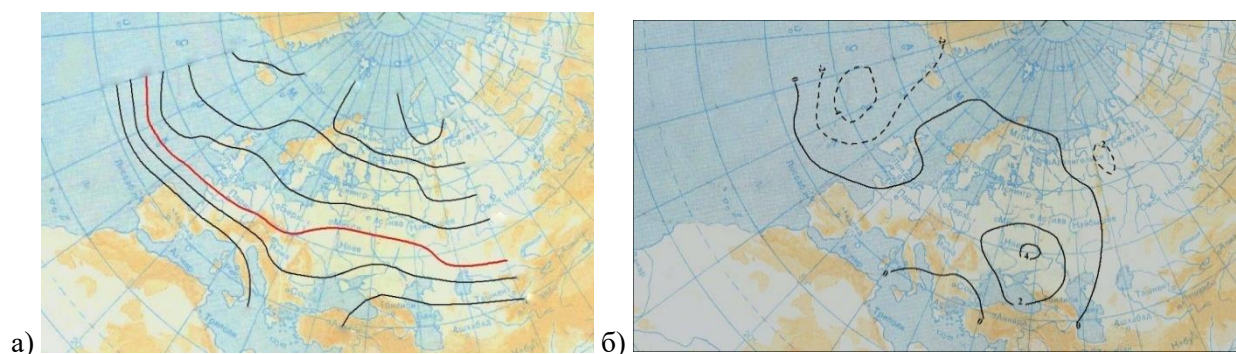


Рис. 1. Барическое поле на среднем уровне тропосферы (а) и поле аномалий геопотенциала средней тропосферы (б) во вторую волну глобального потепления [9, 11]

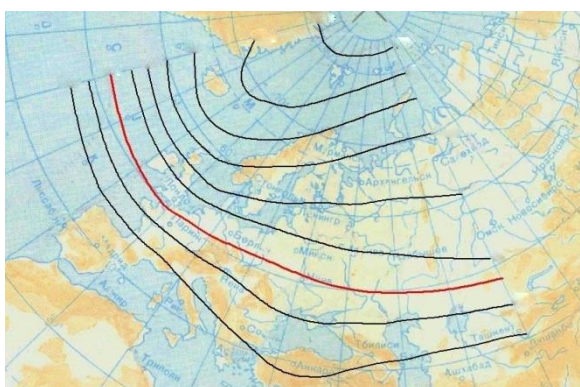


Рис. 2. Барическое поле на среднем уровне тропосферы в период стабилизации [9, 11]

Таким образом, при проведении настоящего исследования выявлены пространственные и временные особенности изменения характера циркуляции в Нижнем Поволжье. Особенности течения атмосферных процессов в регионе указывают на перестроечные процессы в атмосфере. Рост повторяемости арктических антициклонов в Нижнем Поволжье может указывать на повышении роли летних сезонов в наблюдаемом потеплении. Укажем, что в развитие потепления обычно больший вклад вносят зимние сезоны. Увеличение вклада летних сезонов является не характерным для функционирования земной климатической системы, по крайней мере в исторической период времени.

### Список литературы

1. Архангельский В.Л. Региональная синоптика Нижнего Поволжья. Саратов: Изд-во Саратовского университета. 1968. 208 с.
2. Второй Оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Изд-во ЗАО «Группа морепродукты». 2014. 60 с.
3. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М. 2009. 372 с.
4. Морозова С.В. Характер циркуляции атмосферы в атлантико-евразийском секторе полушария как индикатор климатических изменений на Русской равнине (на примере зимы) // Изв. Саратовского университета. Новая серия. Том 12. Серия Науки о Земле. 2012. Вып. 2. С. 34-37.
5. Морозова С.В. Физико-статистический анализ современных климатических изменений в Атлантико-Евразийском секторе зимой (на примере января) // Труды ГИЦ. 2015. Вып. 358. С. 88-98.
6. Морозова С.В. Исследование циркуляции атмосферы в Атлантико-Евразийском секторе полушария на фоне настоящих климатических изменений летом (на примере июля) // Изв. Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. Том 15. 2015. Вып. 1. С. 21-24.
7. Морозова С.В. Исследование синоптических процессов методом эталонов. Саратов. Изд-во СГУ. 2013. 164 с.
8. Морозова С.В. Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных синоптических процессах. Саратов. Изд-во СГУ. 2019. 132 с.
9. Морозова С.В., Алимпиева М.А. Оценка вклада углекислого газа в наблюдаемые климатические изменения статистическими методами // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием «Земля и космос». СПб Изд-во «Мономакс». С.254-258.
10. Морозова С.В., Полянская Е.А. Анализ особенностей атмосферной циркуляции летом в Атлантико-Евразийском секторе полушария на фоне наблюдаемой климатической изменчивости // Климат и природа. Москва, 2017. №1. С. 33-48.
11. Полянская Е.А. Синоптические процессы и явления погоды в Нижнем Поволжье. Саратов: Изд-во Саратовского университета. 1986. 208 с.
12. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2013: The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
13. SV Morozova. EA Polyanskaya. GF Ivanova. NG Levitskaya. KE Denisov. NP Molchanova Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the background of global climate trends // IOP Conference Series: Earth and Environmental (EES). Volume 107. 2018.

# О СОЗДАНИИ БАЗЫ ГЕОДАННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ БИОЭНЕРГЕТИКИ СРЕДСТВАМИ ГИС

**Т.И. Андреевко, Ю.Ю. Рафикова, Н.В. Тетерина**  
*ju.rafikova@gmail.com; ninok.net@gmail.com*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
географический факультет, Россия, г. Москва*

Для развития биоэнергетической отрасли Россия обладает значительной ресурсной базой. В нашей стране основным сырьем биоэнергетики являются все виды веществ растительного и животного происхождения, продукты жизнедеятельности различных организмов и органические отходы, образующиеся в процессах производства, потребления продукции и на этапах технологического цикла. На основе этого можно выделить основные категории биомассы:

- отходы растениеводства (лузга, шелуха, солома, тростник и т. д.), животноводства, лесопромышленного комплекса (ЛПК);
- бытовые отходы, канализационные стоки и др.;
- сельскохозяйственные культуры (в том числе специально выращиваемые для получения биотоплива);
- древесная биомасса [1].

В настоящее время переработкой древесины и древесных отходов занимается довольно большое число российских предприятий. Для ряда компаний топливо из отходов является побочным продуктом, так как в производстве реализована технология полного цикла переработки - примеры таких предприятий: ООО «ПечораЭнергоресурс», ООО «Соломбалалес», ООО «ДОЦ». Другая группа компаний непосредственно специализируется на производстве пеллет и брикетов из древесных отходов – например, ООО «Поли-Ном», ООО «АМВ bio», ООО «Эколес-Пижма», ОАО «Выборгская целлюлоза». Заметное место на рынке биотоплива занимают предприятия, добывающие торф и производящие из него топливные брикеты. Было выделено более 35 крупных компаний, занятых в данной отрасли по всей России, многие из них являются членами Некоммерческого партнерства «Российское торфяное и биоэнергетическое общество» [2].

Геоинформационные технологии способны решить следующие задачи биоэнергетической отрасли:

1. Оценка ресурсного потенциала биомассы и его распределения по территории.
2. Доступность инфраструктурных объектов (электросети, дороги и т. п.) в регионах с высоким потенциалом биоэнергетики.
3. Учет широкого спектра критериев, ограничивающих реализацию проектов биоэнергетики на выбранных территориях.
4. Оценка концентрации научно-технологического потенциала.
5. Оценка наличия опыта реализации биоэнергетических проектов



Сотрудниками научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии (ВИЭ) географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова с 2009 года ведутся работы по оценке потенциалов энергетики от различных видов ВИЭ. Основные результаты опубликованы в Атласе ресурсов возобновляемой энергии на территории России [3] и в геоинформационной системе (ГИС) ВИЭ России, размещённой на сайте Gisre.ru [4].

В Атласе [3] на основе статистических данных, приведенных в ежегодных докладах Федерального агентства лесного хозяйства [5] были определены валовый и технический потенциал ЛПК (рис. 1).

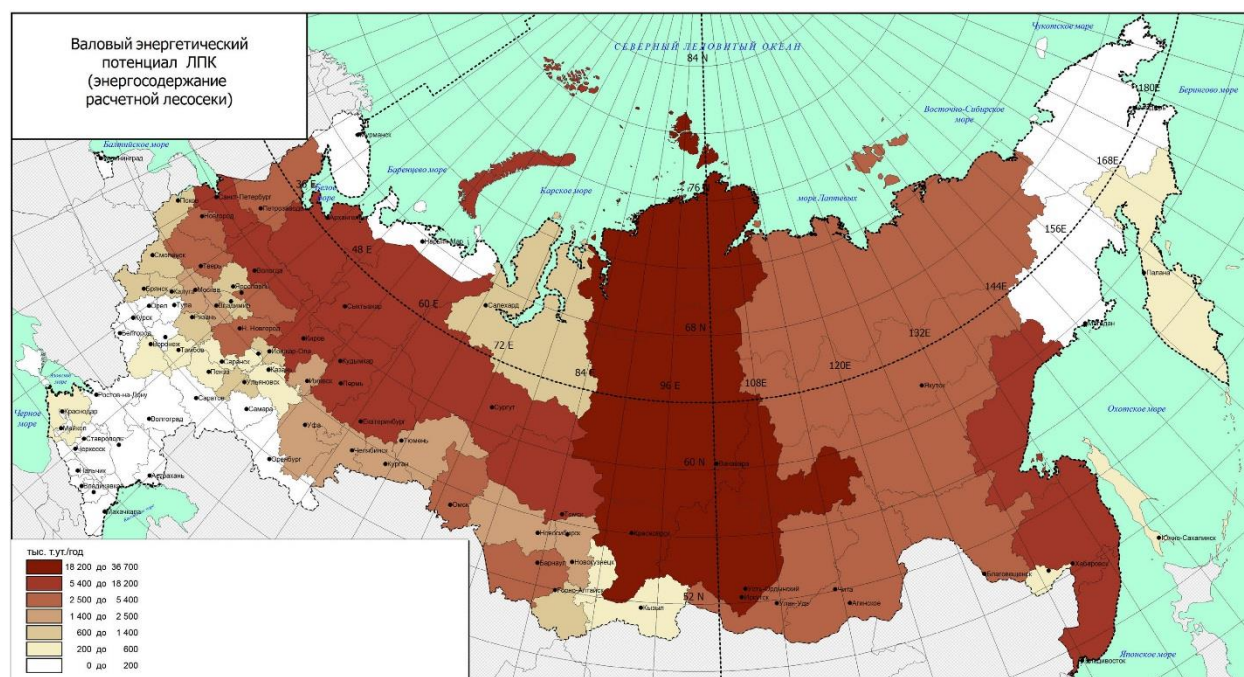


Рис. 1. Карта валового энергopotенциала ЛПК (энергосодержание расчетной лесосеки) [3]

Валовый потенциал энергии биомассы субъектов РФ определяется общим количеством органических отходов, образующихся на территории. Поэтому распределение валового потенциала по субъектам России является более сглаженным по сравнению с распределением отдельных ресурсов биомассы. Максимальным суммарным валовым энергетическим потенциалом биомассы обладают регионы с максимальной величиной расчетной лесосеки, которая дает определяющий вклад в валовый потенциал (Иркутская область, южная часть Красноярского края, Вологодская область, Архангельская область, Кировская область, Пермский край, Ленинградская область, Республика Коми, Свердловская область), минимальным – субъекты РФ, имеющие климатические условия, не предполагающие возможность ведения сельского хозяйства и заготовку лесоматериалов (Республика Саха (Якутия), Ненецкий АО, Чукотский АО, Магаданская область, Мурманская область) [3]. Регионы, имеющие максимальные значения расчетной лесосеки (Костромская, Архангельская, Коми, Вологодская, Свердловская, Тюменская области, Республики Коми, Пермский край, Красноярский край),

характеризуются значительным валовым энергетическим потенциалом отходов лесного хозяйства.

Некоторые из вышеупомянутых регионов в последние годы активно используют принципы экономики замкнутого цикла в своём ЛПК – в частности, Архангельская область. Расположенные в ней крупные лесопромышленные предприятия сами перерабатывают свои отходы для энергообеспечения в собственных котельных, чтобы минимизировать использование мазута и расходы на вывоз и утилизацию отходов своего производства. При этом у мелких лесопильных предприятий возникает проблема, связанная с плохой транспортной доступностью и низким качеством дорог в регионе, поэтому вариант вывоза их отходов лесопиления на крупные предприятия г. Архангельска убыточен по причине высокой цены транспортных расходов. Малым лесопильным предприятиям рационально установить оборудование и производить топливные брикеты и пеллеты, которые будет легко хранить и транспортировать к месту продажи [6].

Для определения возможностей перехода предприятий лесной промышленности на безотходные технологии замкнутого цикла целесообразно использовать ГИС-технологии, позволяющие анализировать факторы, влияющие на перспективы развития биоэнергетики. Авторами создана база данных действующих и строящихся заводов по производству пеллет и топливных брикетов в регионах России, включающую в себя информацию о местоположении завода, используемом сырье для производства пеллет или брикетов, мощности, а также о том, какой организации принадлежит данный завод, какая компания осуществила его строительство (рис. 2).

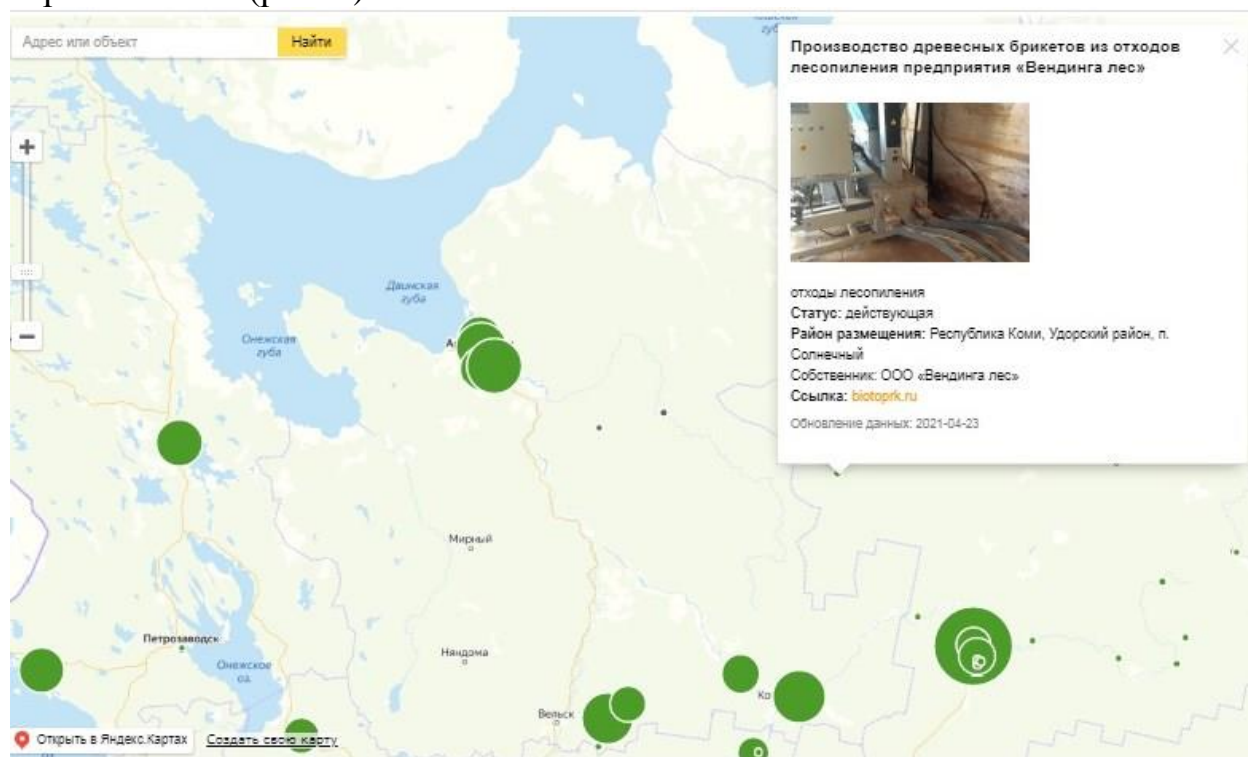


Рис. 2. Действующие и строящиеся заводы, производящие пеллеты, брикеты (подробнее см. <https://gisre.ru/maps/maps-obj/bio>)

Помимо этого, нашим авторским коллективом составлена база данных котельных, работающих на отходах собственного деревообрабатывающего производства, включающую в себя информацию о местоположении ТЭЦ, используемом конкретном виде биотоплива, мощности, назначении, а также о том, какой организации принадлежит данная котельная, какая компания осуществила её строительство, кто является потребителем производимого тепла (рис. 3).

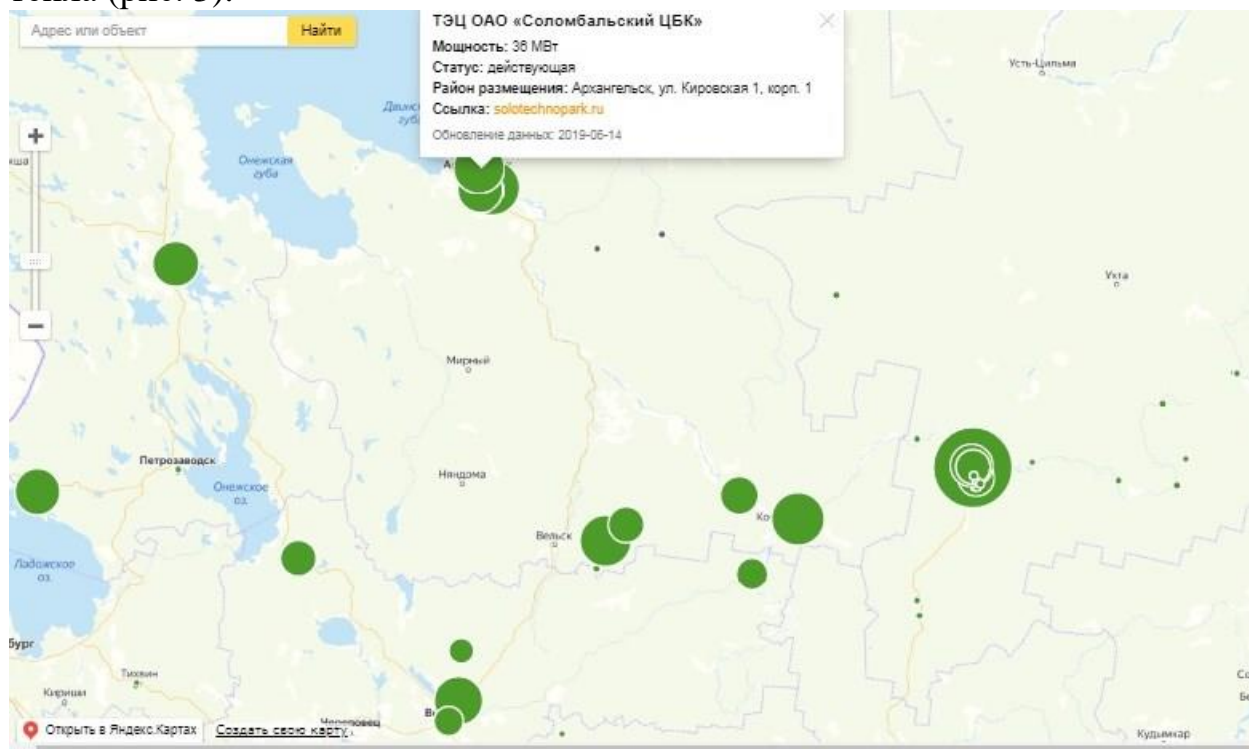


Рис. 3. Действующие и строящиеся ТЭЦ, работающие на твердом древесном топливе - отходах собственного деревообрабатывающего производства (подробнее см. <https://gisre.ru/maps/maps-obj/bio>)

Включение объектов этих баз данных в ГИС ВИЭ России [4] позволяет перейти от этапа общенациональных и региональных оценок энергетических ресурсов отходов лесной промышленности к более детальным локальным оценкам, включающим в себя анализ инфраструктурных и экономических факторов. Проведение таких оценок входит в ближайшие планы нашего авторского коллектива.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 20-010-00981 и государственного задания «Географические основы устойчивого развития энергетических систем с использованием возобновляемых источников энергии».*

### Список литературы

1. Тенденции развития промышленного применения биотехнологий в РФ. Учреждение РАН Институт Биохимии им. А.Н. Баха, Москва, 2011. 323 с. <http://sedi2.esteri.it/Sitiweb/AmbMosca/Pubblicazioni/Faldoni/biotecnologierus.pdf>

2. Кудрявцева О. В., Яковлева Е. Ю. Некоторые аспекты развития биоэнергетики в России / Биоэкономика в России: возможности развития (коллективная монография) / Под

редакцией С.Н. Бобылёва, П.А. Кирюшина и О.В. Кудрявцевой – Москва: Проспект М, 2017. – С. 81-85.

3. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / Т.И. Андреевко, Т.С. Габдрахманова, О.В. Данилова и др. – РХТУ им. Д.И. Менделеева Москва, 2015. – 160 с.

4. Сайт проекта «Геоинформационная система “Возобновляемые источники энергии России”» [www.gisre.ru](http://www.gisre.ru)

5. Ежегодный доклад Федерального агентства лесного хозяйства о состоянии и использовании лесов РФ за 2012 г. // Официальный сайт Федерального агентства лесного хозяйства [www.rosleshoz.gov.ru](http://www.rosleshoz.gov.ru)

6. Бородин И. Воздействие на окружающую среду надо контролировать // ЛесПромИнформ. – 2011. - № 1 (75). – С. 68-71.

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРЕЙ В НОРВЕЖСКОМ И ГРЕНЛАНДСКОМ МОРЯХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В 2007 ГОДУ

**А.В. Артамонова, И.Е. Козлов**

*artamonowa.anastasya2011@yandex.ru*

*Морской гидрофизический институт РАН, Россия, г. Севастополь*

Норвежское и Гренландское моря являются районами с высокой вихревой активностью, что играет важную роль в перераспределении вод между Атлантическим и Северным Ледовитым океаном, а также в распределении тепла и биогенных элементов [1,2,3].

В данном исследовании на основе анализа данных спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) за теплый период 2007 года впервые проводится анализ поля вихрей Норвежского и Гренландского морей. Приводятся карты пространственного распределения основных районов наблюдения вихрей, их пространственных характеристик.

## **Данные и методы**

Генерация и последующее распространение вихревых структур сопровождается изменениями в поле поверхностных течений, формировании выраженных зон конвергенции и дивергенции течений, которые взаимодействуют с ветровыми волнами, пленками и поверхностно-активными веществами, что в свою очередь приводит к формированию поверхностных проявлений вихревых структур, наблюдаемых на радиолокационных изображениях (РЛИ) в виде контрастов обратного рассеяния сигнала РСА [4].

Для анализа вихревой динамики на акватории Норвежского и Гренландского морей использовались РЛИ Envisat ASAR с мая по октябрь 2007 года в режиме съемки WSM с шириной полосы обзора 400x400 км и пространственным разрешением 150x150 м. В ходе анализа выделялись вихри, наблюдаемые на безледных участках морской поверхности.

На основе анализа поверхностных проявлений вихревых структур в РСА изображениях определялись районы генерации вихрей, их диаметр, знак вращения, тип проявления и глубина места, соответствующая центру вихря. Определение характеристик вихревых структур проводилось на основе методики, описанной в работе [5]: анализ данных выполнялся в программной среде Mathworks ©Matlab, проявления вихрей на РЛИ картировались в полуавтоматическом режиме, после чего вручную для каждого вихря выделялись вышеперечисленные характеристики.

## **Результаты работы**

Всего в ходе исследования проанализировано 730 спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ), в которых идентифицировано 3327 поверхностных проявлений вихрей (ППВ). На рис. 2 представлено пространственное распределение количества данных РСА для исследуемого района. Наибольшее количество данных РСА наблюдается на Севере и Северо-Западе исследуемой области, а также в районе плато Воринг.



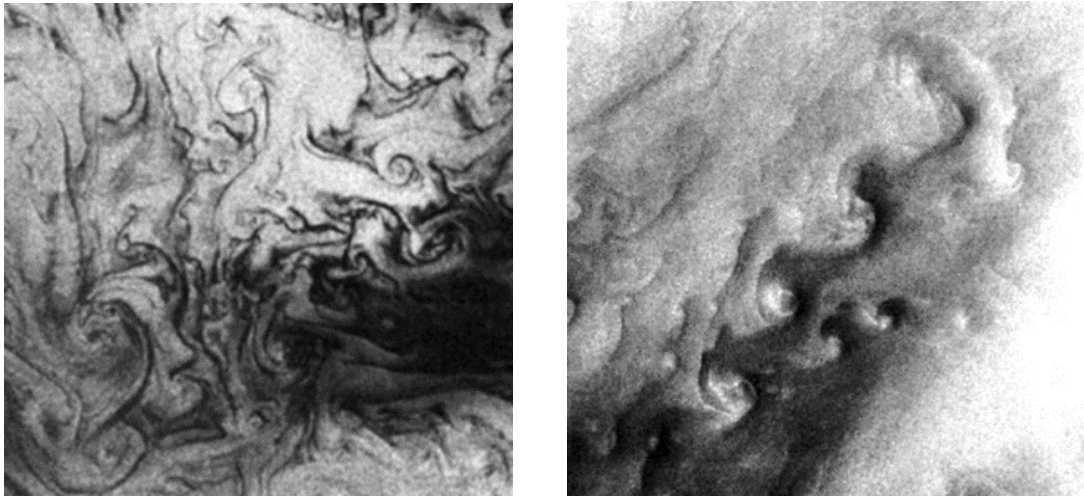


Рис. 1. Примеры проявлений вихревых структур на изображениях спутниковых РСА, обусловленных: 1) скоплением поверхностных плёнок в зонах конвергенции поверхностных течений, 2) взаимодействием волн и течений

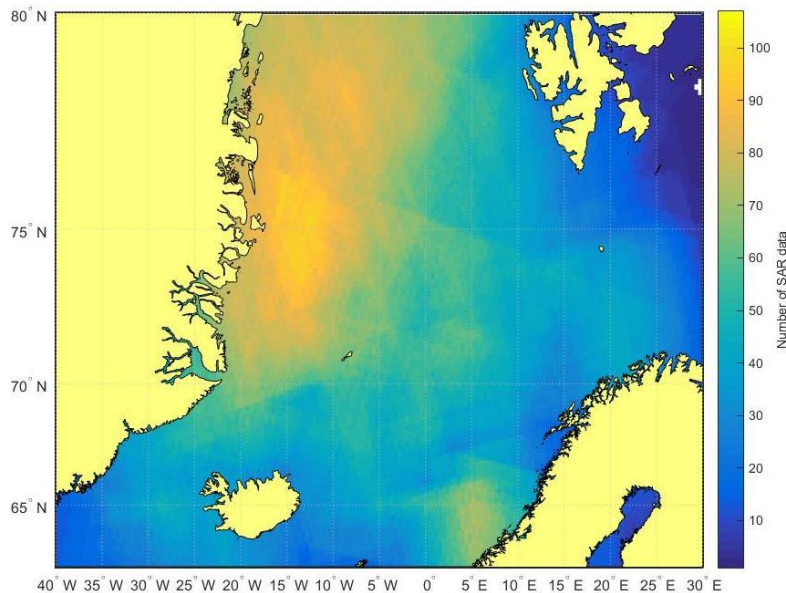


Рис. 2. Карта покрытия исследуемого района спутниковыми данными

На рис. 3 (слева) можно видеть, что количество РЛИ, приходящихся на каждый месяц кардинально не отличается, однако на рис 3. (справа) видно, что наибольшее количество поверхностных проявлений вихревых структур было зарегистрировано в мае (1121), а наименьшее в октябре (47).

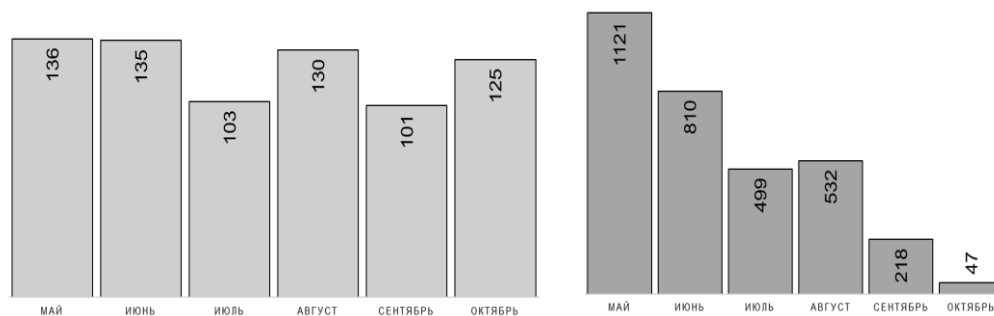


Рис. 3. Гистограммы распределения количества РЛИ (слева) и зарегистрированных вихрей (справа) с мая по октябрь 2007 года

На рис. 4 представлено пространственное распределение количества идентифицированных вихрей.

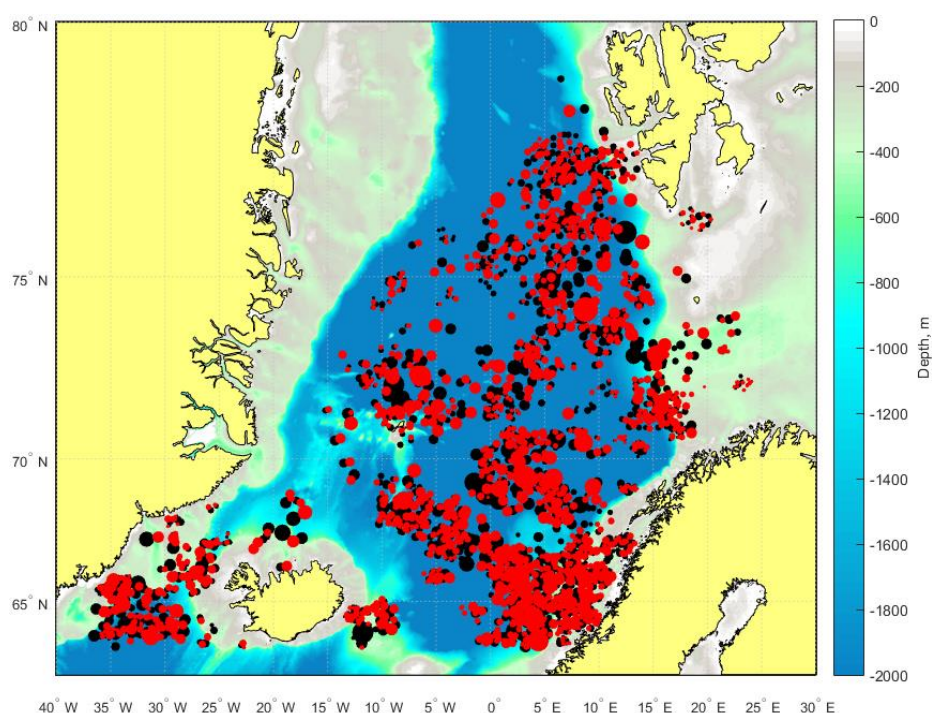


Рис. 4. Пространственное распределение вихрей, идентифицированных в данных спутниковых РСА в мае-октябре 2007 года. Черные (красные) кружки обозначают циклонические (антициклонические) вихри. Размер маркера пропорционален диаметрам вихрей

Количество антициклонических вихрей составило 1627, циклонических – 1600. Вихри располагались в основном на свалах глубин и на границах крупных течений. Наибольшие скопления вихрей обнаружены вдоль границы Норвежской котловины, вдоль хребта Мона, на границе Восточно-Исландского и Северо-Атлантического течений, в Датском проливе.

Гистограмма распределения диаметров зарегистрированных вихрей показана на рис. 5. В основном, диаметры наблюдаемых вихрей не превышали 15 км. Средний зарегистрированный диаметр вихрей составил 13,9 км. Средний диаметр антициклонических и циклонических вихрей отличается незначительно (13,98 и 13,85 соответственно). Максимальный зарегистрированный диаметр вихря составил 154 км. Максимальный диаметр антициклонического и циклонического вихря отличаются незначительно (154 км и 143 км соответственно). Минимальный зарегистрированный диаметр вихря составил 158 м. Минимальный диаметр циклонического вихря составил 862 м, антициклонического - 158 м.

Гистограмма распределения глубин, над которыми регистрировались вихри показана на рис. 6. Вихри наблюдались над глубинами от 26 м до 3776 м, со средним значением 1817 м. Наибольшее количество вихрей зарегистрировано над глубинами, не превышающими 500 м, однако большое количество вихрей также располагалось и над глубинами, превышающими 1000 м.

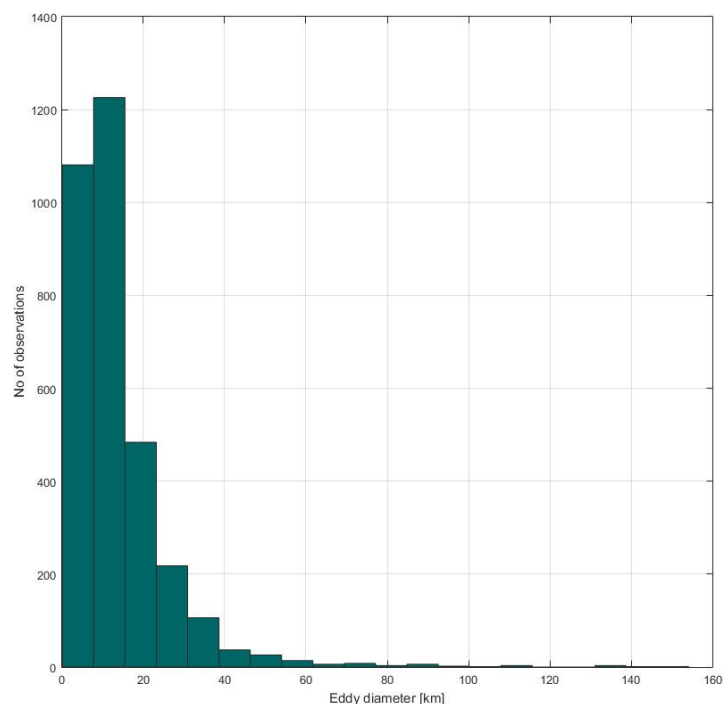


Рис. 5. Гистограмма распределения диаметров вихрей

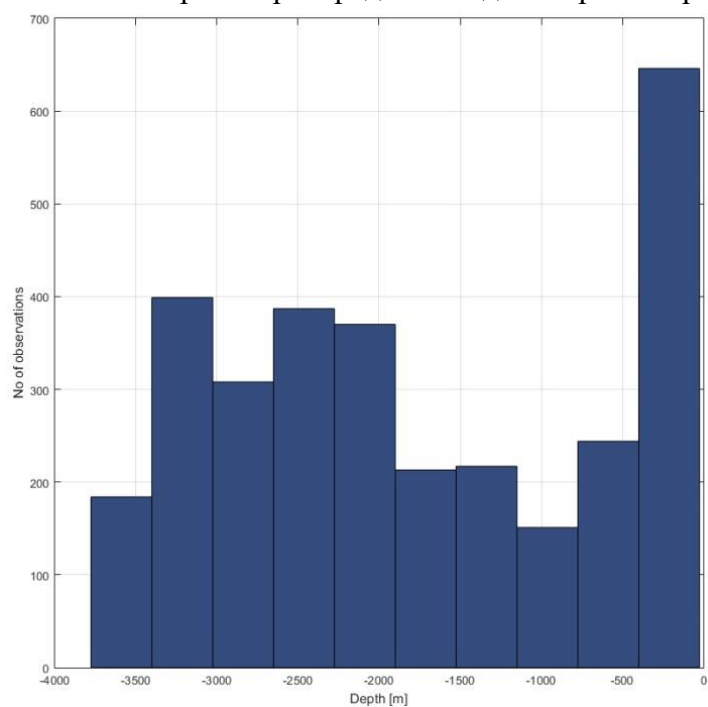


Рис. 6. Гистограммы распределения глубин, над которыми были идентифицированы вихри

На рис. 7 показано пространственное распределение общего количества идентифицированных вихрей на сетке 50x50. Наибольшее количество вихрей обнаружено в районе плато Воринг, Норвежской котловины, Датского пролива, Шпицбергенской банки, Хребта Мона.

На рис. 8 представлено пространственное распределение величины среднего (слева) и максимального (справа) диаметра вихрей на сетке размером 50x50 узлов. Эти распределения в целом пересекаются. Вихри с максимальными диаметрами регистрировались в районе Шпицбергенской банки, Норвежской котловины и плато Мона.



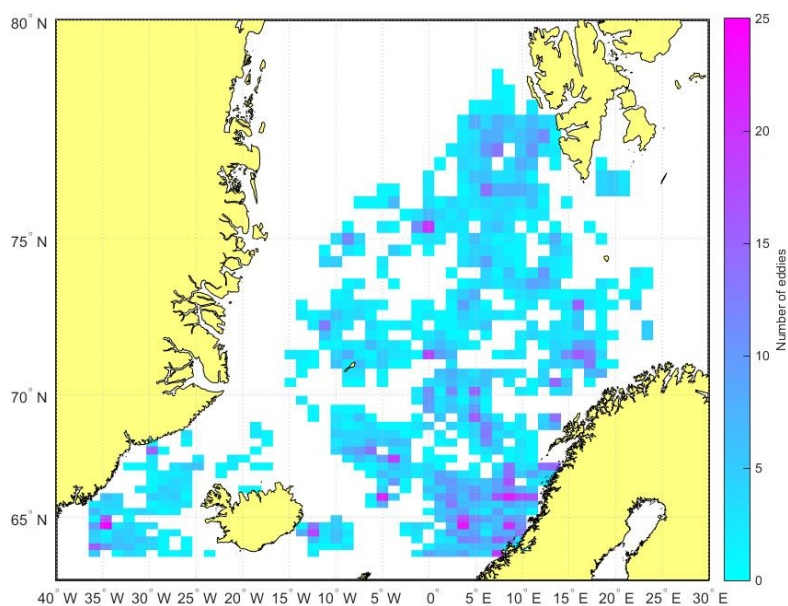


Рис. 7. Пространственное распределение общего количества вихрей, идентифицированных в открытой воде по данным спутниковых РСА в мае-октябре 2007 г. на сетке размером 50x50 узлов

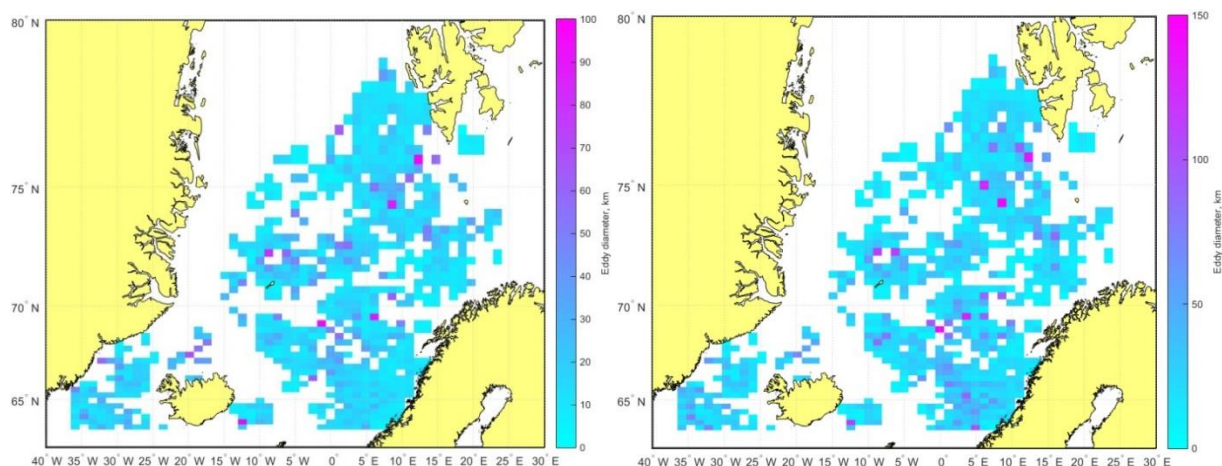


Рис. 8. Пространственное распределение среднего (слева) и максимального (справа) диаметра вихрей, идентифицированных по данным спутниковых РСА в мае-октябре 2007 г. на сетке размером 50x50 узлов

На рис. 9 показано пространственное распределение повторяемости наблюдения вихрей в районе исследований. Как видно, вихри наиболее часто наблюдаются в районе плато Воринг, Шпицбергенской банки, Норвежской котловины и Датского пролива.

### Заключение

Отличительной особенностью поверхностных проявлений вихрей в исследуемом районе за период с мая по октябрь 2007 года является примерно одинаковое количество выделенных циклонических и антициклонических вихрей, что схоже с результатами альтиметрических наблюдений в этом районе (3) и существенно отличается от результатов, приведенных в схожих исследованиях для других морей Арктики, например, [4,5,6].

Показано, что вихри наиболее часто наблюдаются в районе плато Воринг, Шпицбергенской банки, Норвежской котловины и Датского пролива. Максимальные и наибольшие диаметры регистрировались в районе Шпицбергенской банки, Норвежской котловины и плато Мона.

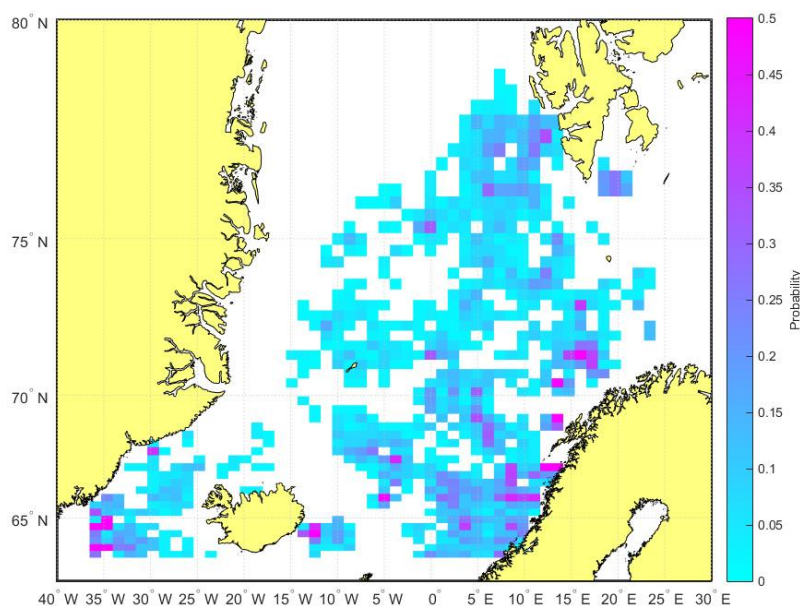


Рис. 9. Пространственное распределение повторяемости наблюдения вихрей, идентифицированных по данным спутниковых РСА в мае-октябре 2007 года на сетке размером 50х50 узлов

*Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ №18-35-20078 мол\_а\_вед, РНФ 21-17-00278 и государственного задания 0555-2021-0003.*

#### Список литературы

1. Каменкович В. М., Кошляков М. М., Монин А. С. Синоптические вихри в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 511 с.
2. Hansen C., Kvaleberg E., Samuelsen A. Anticyclonic eddies in the Norwegian Sea; their generation, evolution and impact on primary production // Deep-Sea Research I. 2010. Vol. 57. P. 1079–1091.
3. Bashmachnikov I.L., Kozlov I.E., Petrenko L.A., Glok N.I., Wekerle C. Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from Satellite Altimetry, SAR and High-Resolution Model Data // J. Geophys. Res: Oceans. 2020. Vol. 125.
4. Артамонова А.В., Козлов И.Е., Зимин А. В. Характеристики вихрей в Чукотском море и море Бофорта по данным спутниковых радиолокационных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. №1. С. 203-210.
5. Kozlov I. E., Artamonova A.V., Manucharyan G.E., Kubryakov A.A. Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. № 124. P 1-16.
6. Atadzhanova O.A., Zimin A.V. Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White seas using satellite data // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2019. Vol.12, № 3. P. 36–45.

## ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И КИСЛОРОДА В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ ЧЕРНОГО МОРЯ

<sup>1</sup>А.К. Ахсалба, <sup>2</sup>С.И. Марандиди

*asida\_cen@mail.ru; sofa-291088@mail.ru*

<sup>1</sup>Абхазский государственный университет, Абхазия, г. Сухум

<sup>2</sup>Институт экологии Академии наук Абхазии, Абхазия, г. Сухум

**Аннотация.** На основании натурных исследований, дан анализ динамики концентрации  $CO_2$  и  $O_2$  в атмосфере прибрежной части Абхазии; проведена оценка сезонных изменений потоков  $CO_2$  и  $O_2$ ; показана зависимость  $CO_2$  и  $O_2$  от изменения температуры морской воды.

**Ключевые слова.** Мониторинг, морская вода, газоперенос, углекислый газ, эвазия.

### Введение

Интерес к исследованиям переноса углекислого газа ( $CO_2$ ) между атмосферой и океаном обусловлен в первую очередь той ролью, которую играет  $CO_2$  в глобальных процессах, влияющих на формирование климата и изменение фундаментальных характеристик морской среды. Океан является важным звеном в процессах поглощения из атмосферы углекислого газа антропогенного происхождения, а депонирование и трансформация дополнительного углекислого газа приводит к существенным изменениям характеристик морской среды [4, с. 137]. В изучении динамики обмена углекислого газа между морской водой и атмосферой большой интерес представляет установление ее временных масштабов, что позволяет оценить и сопоставить вклад различных факторов, влияющих на карбонатную систему, а также направление и величину потока  $CO_2$ .

Температура морской поверхности является наиболее важным фактором, определяющим не только величину, но и направление потока  $CO_2$  на поверхности моря. В частности, от температуры поверхности моря почти полностью зависит растворимость углекислого газа в морской воде. С повышением температуры воды растворимость  $CO_2$  снижается, а с понижением – повышается [6, с. 210]. От пространственного распределения температуры зависит жизнедеятельность морских организмов, за счет которой возникают мощные источники и стоки  $CO_2$ . Их действие обусловлено процессами поглощения  $CO_2$  при фотосинтезе и, наоборот, его выделением при окислении органического вещества. Если влияние температуры поверхности моря на растворимость углекислого газа является понятным и однозначным, то связь биологических процессов с температурой и их взаимное влияние весьма сложно и многообразно. В общем случае распределение биомассы фитопланктона и его чистая первичная продукция определяются температурой воды, наличием света и питательных веществ (в первую очередь, азота и фосфора). Эти лимитирующие рост фитопланктона

факторы в свою очередь подвергаются влиянию процессов циркуляции моря, динамики слоя перемешивания и апвеллинга [7, с. 754]. В результате все факторы, оказывающие влияние на величину и направление потока  $\text{CO}_2$ , а также на особенности его пространственно-временной изменчивости, связаны между собой как прямыми, так и обратными зависимостями, которые при определенных условиях способны либо усиливать, либо подавлять эффект их совместного воздействия. В частности, температура поверхности моря, помимо прямого влияния на растворимость  $\text{CO}_2$  в морской воде, оказывает опосредованное воздействие на величину чистой первичной продукции фитопланктона, которая тесно связана с процессами биологического потребления углерода, а, следовательно, с потоками  $\text{CO}_2$  на поверхности раздела море–атмосфера. В связи с этим представляется весьма важным выявление влияния температуры поверхности моря на обмен углекислым газом с атмосферой в различных пространственно-временных масштабах.

Согласно существующим представлениям, даже небольшие изменения средней скорости ветра над морской поверхностью могут заметно сказаться на среднем газообмене: изменится вероятность сильных ветров, которые вносят существенный вклад в средний поток  $\text{CO}_2$  и почти полностью определяют средний поток кислорода. Вклад сильного ветра в перенос кислорода и  $\text{CO}_2$  сильно различается. Изменение температуры проявляется по-разному в различных деталях механизма газопереноса, но изменение менее чем на  $5^\circ\text{C}$  представляется мало существенным [1, с. 10, 2, с. 253, 3, с. 34].

По данным Я.А. Экба и Р.С. Дбар [5, с. 27] многолетняя изменчивость среднегодовой температуры морской воды в акватории г. Сухум находится в пределах  $15,2\text{--}17,6^\circ\text{C}$ . При общем положительном тренде температуры верхнего горизонта моря, составляющем  $0,4\text{--}0,5^\circ/100$  лет, с начала XX века и до 90-х гг. она понижалась. Начиная с 1994 г., температура воды стала повышаться синхронно с повышением температуры воздуха [1, с. 12]. За последние десятилетия температура верхнего горизонта сухумской акватории повысилась на  $1,1^\circ\text{C}$ . Наименьшая средняя месячная температура поверхностного слоя воды в прибрежной зоне наблюдается в феврале, что в целом согласуется с общим ходом теплового баланса. Наибольшая среднемесячная температура наблюдается в августе. Годовые колебания температуры охватывают поверхностный слой в 150 м, а глубже температура остается почти неизменной и в течение всего года составляет  $8\text{--}9^\circ\text{C}$ , что соответственно и оказывает влияние на газообмен сред: вода–воздух.

#### **Метод исследования**

Проведен анализ динамики концентрации углекислого газа и кислорода в атмосфере прибрежной части Абхазии за период с 2011 по настоящее время по данным мониторинга метеостанции «Маяк», г. Сухум, РА. Непрерывные измерения концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  на метеостанции «Маяк» г. Сухум были начаты в 2011 г., измерения проводились с помощью газоанализатора ПГА-7 и с 2016 года производятся многокомпонентным анализатором газов МАГ – 6П.

## Результаты и их обсуждение

С учетом сезонных колебаний содержания углекислого газа в воздухе и температуры рассчитаны среднемесячные потоки  $\text{CO}_2$ . В годовом ходе концентрация углекислого газа сильно варьировала от минимальных значений 0,003 % в мае месяце при минимальной скорости ветра 4,5 м/с до максимальных 0,18 % в декабре месяце при максимальной скорости ветра 10,1 м/с (рис. 1). Максимальные концентрации углекислого газа в атмосферном воздухе характерны для осенне-зимнего периода.

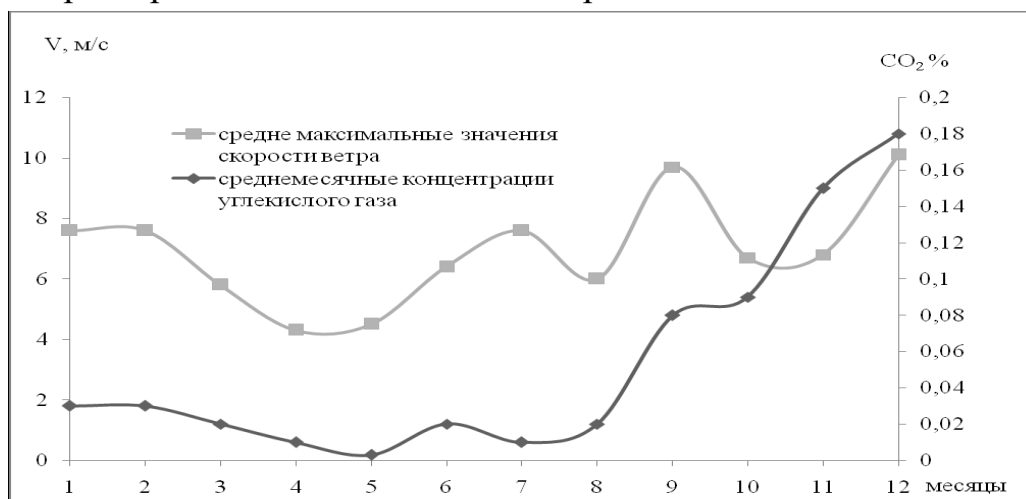


Рис.1. Годовой ход концентрации углекислого газа в прибрежной зоне г. Сухум

В летний период часто наблюдается дефицит осадков, и атмосфера не самоочищается. Поэтому характер выпадения осадков и их количество также являются факторами, влияющими на содержание в воздухе газовых компонентов, в том числе и углекислого газа. К тому же в этот период наблюдается увеличение туристической активности и, соответственно, увеличение количества автомобилей, в связи с чем загазованность также увеличивается. На диаграмме (рис. 2) на примере 2016 года видно, что в июне наблюдалось небольшое увеличение концентрации углекислого газа.

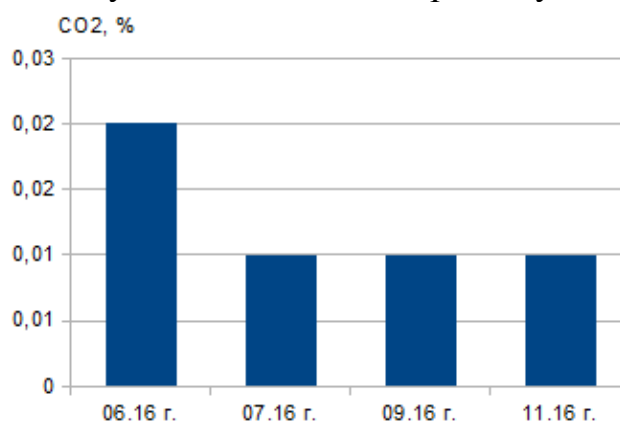


Рис. 2. Углекислый газ в ПСВ, станция "Маяк" г.Сухум, 2016 г.

На рис. 3 представлена динамика сезонного хода концентрации кислорода. Видно, что насыщение воздуха кислородом наблюдается в зимний и весенний периоды. Зимой происходит интенсивное поглощение кислорода

(инвазия) поверхностью моря, летом, наоборот, его выделение (эвазия) в атмосферу. Однако средние за зиму и за лето потоки далеко не уравнивают друг друга, поскольку в летний период велико влияние бризовых ветров, высокой влажности воздуха и фотосинтеза растительности суши, которые могут существенно влиять на концентрацию кислорода в атмосферном воздухе прибрежной зоны.

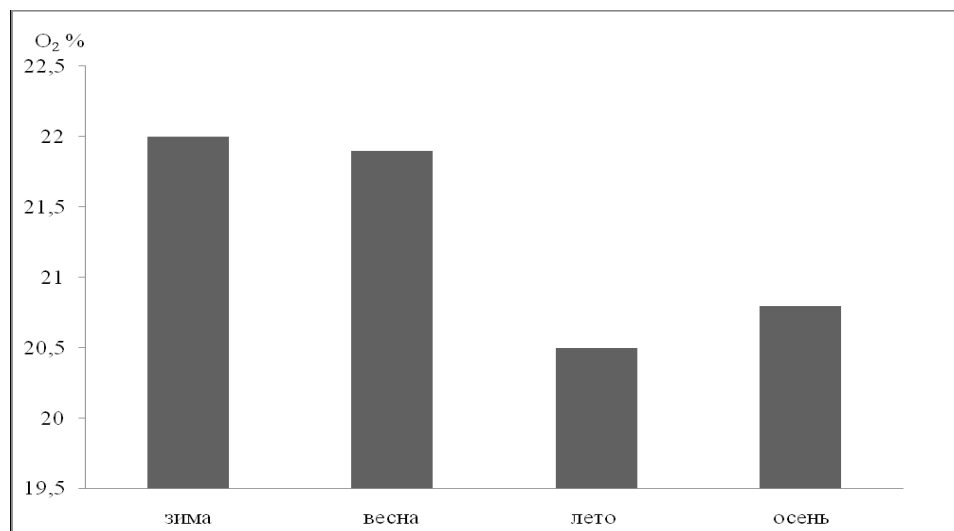


Рис. 3. Сезонный ход концентрации кислорода в прибрежной зоне г. Сухум

В годовом ходе для кислорода минимальные и максимальные концентрации больше коррелируют (обратная зависимость) с температурой воды (20,2 %) в августе месяце при температуре воды 28,9 °С и максимальное 22,7 % в марте при температуре воды 8,2 °С (рис. 4).

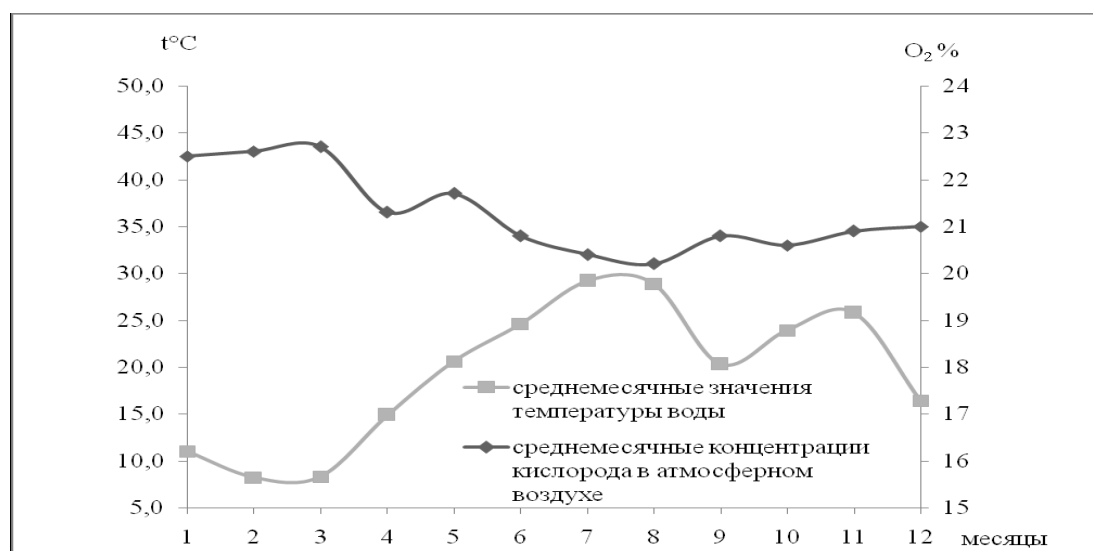


Рис. 4. Годовой ход концентрации кислорода и среднемесячные значения температуры морской воды в прибрежной зоне г. Сухум

Известно, что источником многих газов является море, но и приземный слой воздуха также влияет на газовый состав морской воды, т.е. в системе «вода-воздух» происходят процессы взаимообмена компонентов. Очень важным является изучение межсезонных аномалий тех или иных

компонентов, содержащихся в атмосферном воздухе или в водной среде. В частности, если говорить о кислороде, когда в морской воде происходит произрастание водорослей, а это наблюдается в летний период, то концентрация растворенного кислорода значительно понижается за счет потребления именно водорослями при их росте. И соответственно температура морской воды максимальна в летние периоды, и в связи с этим концентрация растворенного кислорода меньше, чем не скажешь в случае холодного периода, когда соответственно наблюдается более холодная вода, выброс (испарение) газовых компонентов не происходит, развитие водорослей не наблюдается, а значит биологическое потребление кислорода в связи с этим минимально, и концентрация растворенного кислорода в водной среде увеличивается (рис. 5).

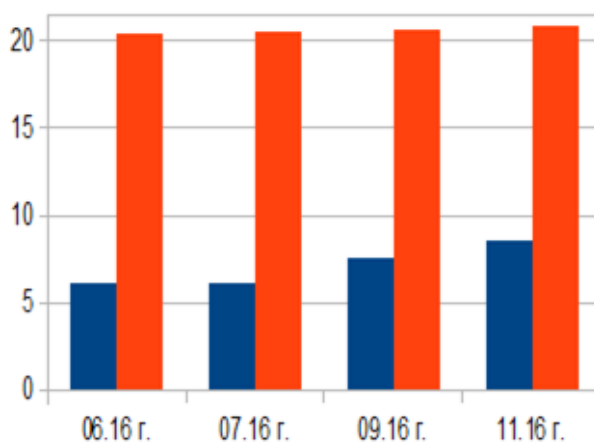


Рис. 5. Растворенный кислород (синяя диаграмма, мг O<sub>2</sub>/л) и кислород ПСВ (красная диаграмма, O<sub>2</sub>, %), станция "Маяк" г.Сухум, 2016 г.

Отметим что, погодные явления, в частности отсутствие облаков в ясную погоду, либо наличие облачности, т.е. пасмурная погода, а также дождливые дни, оказывают влияние на концентрацию газовых компонентов (рис. 6, 7, 8).

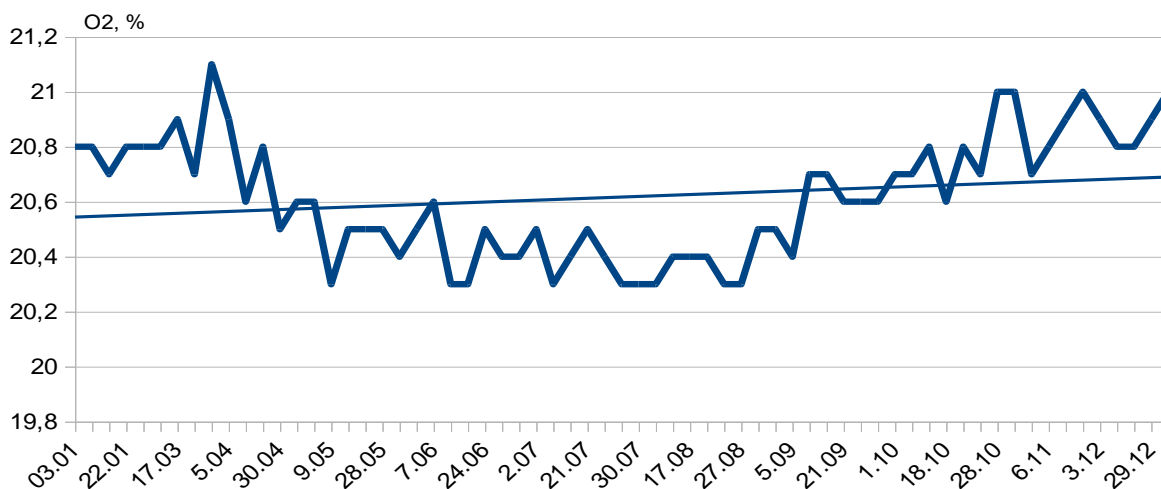


Рис. 6. Годовой ход O<sub>2</sub> в ясную погоду (кривая) за 2018 год на метеостанции "Маяк" г. Сухум



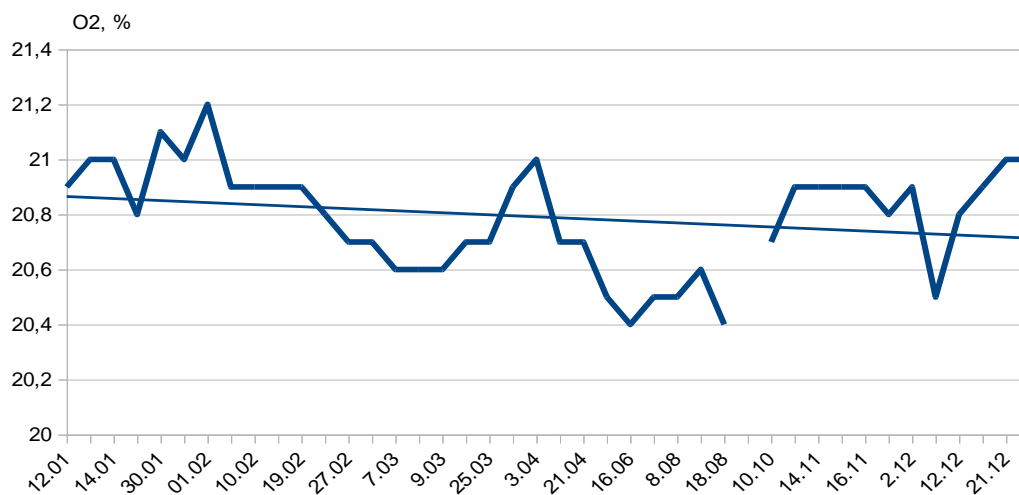


Рис. 7. Годовой ход O<sub>2</sub> в дождливую погоду (кривая) за 2018 год на метеостанции "Маяк" г. Сухум

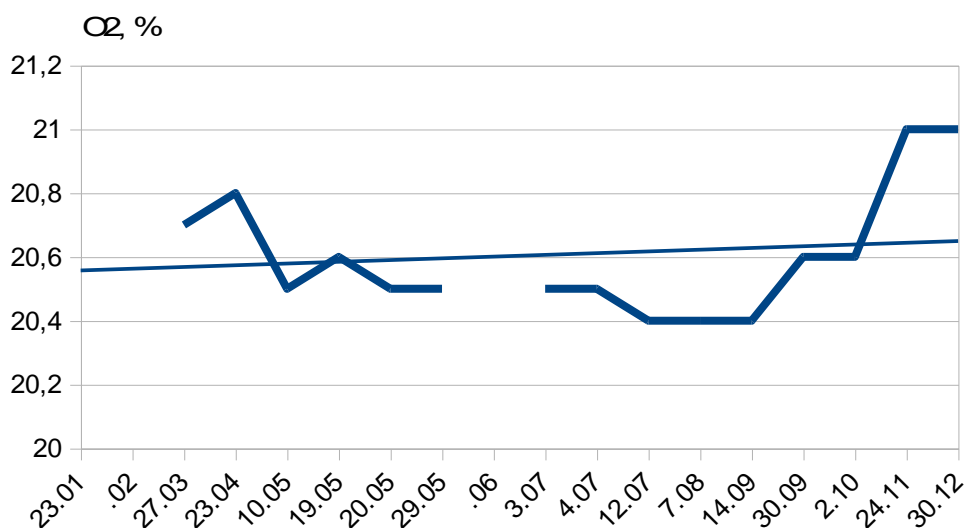


Рис. 8. Годовой ход O<sub>2</sub> в пасмурную погоду (кривая) за 2018 год на метеостанции "Маяк" г. Сухум

На содержание кислорода в воздухе влияют очень много факторов: начиная от процесса фотосинтеза, который является источником поступления кислорода в атмосферный воздух, заканчивая потреблением этого же кислорода живыми организмами и соединением кислорода с другими компонентами среды. Поэтому при пасмурной и дождливой погоде мы не наблюдаем особенных изменений, при ясной погоде кислород максимально соединяется с другими компонентами, поскольку является еще и наилучшим окислителем.

Результаты расчётов корреляционной зависимости углекислого газа и кислорода от гидрофизических параметров произведены нами с помощью коэффициента корреляции  $R$  по следующей формуле:



$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})(t_i - t_{cp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}}$$

Статистическая значимость  $R$  определяется из условия  $R \geq R^*$ , где  $R^*$  - критическое значение коэффициента корреляции, определяемое по табл. 1 при заданном числе степеней свободы ( $\nu$ ) и уровне значимости ( $\alpha$ ), где  $\nu = n - 2$ ,  $n$  - объём ряда,  $\alpha = 5\%$ .

Выводы по статистической значимости корреляции углекислого газа от средних максимальных значений скорости ветра: так как коэффициент корреляции  $0,625761 \geq 0,576$  (критического значения), то с вероятностью 0,95 концентрация углекислого газа зависит от скорости ветра.

Нами также произведён расчёт по статистической значимости корреляции углекислого газа от высоты волны: так как коэффициент корреляции  $0,134632 < 0,576$  (критического значения), то с вероятностью 0,95 концентрация углекислого газа не зависит от высоты волны.

Таблица 1

Критические значения коэффициента парной корреляции

Число степеней свободы ( $\nu$ )	Уровень значимости ( $\alpha$ )	
	5 %	1 %
10	0,576	0,708
11	0,553	0,684
12	0,532	0,661

Аналогичные расчёты нами были произведены и для зависимости концентрации кислорода от гидрофизических параметров.

Выводы по статистической значимости корреляции кислорода и температуры воды: так как коэффициент корреляции  $|-0,913251| > 0,576$  (критического значения), то с вероятностью 0,95 концентрация кислорода зависит от температуры воды; более того, так как коэффициент корреляции  $|-0,913251| > 0,708$  (критического значения), то с вероятностью 0,99 концентрация кислорода зависит от температуры воды.

Выводы по статистической значимости корреляции кислорода и скорости ветра: так как коэффициент корреляции  $|-0,13549| < 0,576$  (критического значения), то с вероятностью 0,95 концентрация кислорода не зависит от скорости ветра.

Выводы по статистической значимости корреляции кислорода и высоты волн: так как коэффициент корреляции  $|0,306777| < 0,576$  (критического значения), то с вероятностью 0,95 концентрация кислорода в атмосферном воздухе не зависит от высоты волны.

### Выводы

Изменение скорости ветра приводит к существенным изменениям эвазии  $\text{CO}_2$  в атмосфере прибрежной зоны. Максимальные потоки концентрации углекислого газа, хорошо коррелирующие со скоростью ветра, выявлены в

осенне-зимний период. Систематизированы и проанализированы данные измерений, характеризующие короткопериодную изменчивость и статистическую структуру поля концентрации кислорода в атмосферном воздухе. Выполнены численные эксперименты и по их результатам получены оценки средних по сезонам потоков кислорода в прибрежной зоне. Сезонные изменения потоков  $O_2$  определяются как сезонными изменениями температуры воды, так и соответствующими изменениями поля концентрации растворенного кислорода. Максимальные концентрации выявлены в зимний и весенний периоды.

Полученные результаты вполне согласуются с общими физико-географическими характеристиками Черного моря.

#### **Список литературы**

1. Ахсалба А.К. Многолетние изменения температуры воздуха и атмосферных осадков на территории Абхазии // Известия вузов Северо-Кавказского региона. – 2007. – № 5. – С. 10-17.
2. Бортковский Р.С. К оценке среднего обмена кислородом и  $CO_2$  между океаном и атмосферой в ключевых районах океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 42, № 2. – С. 250-257.
3. Гицба Я.В., Дбар Р.С., Эмба Я.А. Окислительно-восстановительные реакции в черноморской акватории Абхазии // Труды третьей региональной конференции «Биоразнообразии Кавказа». – Нальчик, 2004. – С. 34-37.
4. Хоружий Д.С., Кондратьев С.И., Медведев Е.В., Шутов С.А. Динамика парциального давления углекислого газа и концентрации растворенного кислорода в шельфовых водах Южного берега Крыма в 2009 – 2010 гг. // Там же. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – Вып. 21. – С. 136 – 145.
5. Эмба Я.А., Дбар Р.С.. Экологическая климатология и природные ландшафты Абхазии. – Сочи, 2007. – 324 с.
6. Weiss R.F. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a nonideal gas // Marine Chemistry. 1974. № 2. P. 203–215.
7. Behrenfeld M. Climatedriven trends in contemporary ocean productivity // Nature. 2006. № 444. P. 752 – 755.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КАРПАТСКОМ РЕГИОНЕ

Н.И. Бахова

*bakhova\_nataly@mail.ru*

*Институт геофизики им. С.И. Субботина Национальной  
Академии Наук Украины, Украина, г. Киев*

**Аннотация.** Построена двумерная термоупругая модель Карпатского региона с использованием метода конечных элементов. Физико-математическая модель максимально приближена к реальной среде. Получено высокоточное детальное распределение температур, теплового потока, термоупругих напряжений и перемещений. Показано, что неравномерное нагревание горных пород и структурные неоднородности приводят к значительным изменениям полей напряжений и перемещений в Карпатском регионе.

**Ключевые слова.** Температура, тепловой поток, термоупругие напряжения, перемещения, неоднородная среда.

Многочисленные теоретические и экспериментальные геофизические исследования показывают, что наблюдаемые в земной коре изменения температуры создают термоупругие напряжения, величины которых достигают предела прочности пород. Это дает основание рассматривать тепловые напряжения как один из источников тектонической и сейсмической активности.

Анализ особенностей теплового поля Карпат и прилегающих прогибов показывает, что распределение тепловых потоков коррелируется с особенностями тектоники Карпатского региона [1, с. 9].

Крупными структурными элементами Карпат являются Закарпатский прогиб, Складчатые Карпаты и Предкарпатский прогиб. Каждый из этих структурных элементов отличается историей своего развития, возрастом и строением фундамента, условиями осадконакопления, мощностью земной коры [2, с. 56; 3, с. 65].

Складчато-покровное строение Карпат свидетельствует о значительных горизонтальных движениях пластин литосферы.

Величина тепловых потоков в Складчатых Карпатах достигает 50–75 мВт/м<sup>2</sup>, во Флишевых Карпатах она не превышает 65 мВт/м<sup>2</sup>. Искажения тепловых потоков в связи с покровным строением Карпатской системы составляет 10–15 % [1, с. 8].

Внешние Складчатые Карпаты и Закарпатский прогиб разделены Закарпатским глубинным разломом.

В Закарпатском прогибе тепловые потоки увеличиваются до 80–90 мВт/м<sup>2</sup>, а в пределах аномальных зон до 100–115 мВт/м<sup>2</sup> [1, с. 6].

От Предкарпатского прогиба горно-складчатое сооружение Карпат отделено глубинным Предкарпатским разломом.

Аномалия высоких тепловых потоков выделяется в северо-западной части Предкарпатского прогиба и вдоль его юго-западного борта (50–70 мВт/м<sup>2</sup>). В наиболее опущенной зоне, где мощность осадков достигает 8–10 км, наблюдаются минимальные тепловые потоки [1, с. 6].

Сейсмические исследования Карпатского региона наглядно свидетельствуют о том, что сейсмоактивным областям соответствуют повышенные значения теплового потока. В Закарпатье значение магнитуды сейсмических событий находится в пределах  $M_{max}=4,7\div 5,3$ , а плотность теплового потока  $q=80\div 100$  мВт/м<sup>2</sup>. В Карпатах  $M_{max}=4,2\div 4,7$ ,  $q=60\div 70$  мВт/м<sup>2</sup>. На северо-востоке Предкарпатского прогиба  $M_{max}=4,7$ ,  $q=50$  мВт/м<sup>2</sup>; на юго-востоке –  $M_{max}=4,1$ ,  $q=40$  мВт/м<sup>2</sup> [4, с. 5].

Тектоническая раздробленность земной коры, наличие контрастных включений и структурных неоднородностей вызывают существенные вариации теплового потока как по латерали, так и по глубине. Связанные с контактными зонами тепловые аномалии достаточно интенсивны и занимают обширные территории [5, с. 266].

Неравномерное нагревание неоднородной среды приводит к возникновению термоупругих напряжений и перемещений. Оценка чисто термоупругого вклада в напряженное состояние литосферы показывает, что тепловые напряжения могут оказывать существенное влияние на образование сейсмически активных зон [6, с. 76].

Представляет большой интерес дальнейшее изучение термоупругих эффектов, поскольку все механизмы землетрясений прямо или косвенно связаны с тепловым полем Земли.

В настоящей работе предложена методика расчета термоупругих напряжений и перемещений в Карпатском регионе на основе численного метода конечных элементов.

Основополагающим моментом в решении термоупругой задачи является определение изменений температуры  $\Delta T$ .

Из теории термоупругости известно, что изменения температуры  $\Delta T$  отсчитываются от значения  $T_0$ , при котором состояние тела считается недеформированным при отсутствии внешних сил [7, с. 28].

В геофизике определить температуру недеформированного состояния геологического тела довольно сложно. Необходимо принять несколько условных соглашений.

В геотермической активности Карпат выделены два этапа.

Первый этап совпадает с начальным этапом формирования Карпатской геосинклинали. Региональная аномалия слабой интенсивности обусловлена источником тепла, сформированным в верхней мантии 160–180 млн лет назад.

Основной источник тепловой энергии на втором этапе находился внутри Карпатской области, западнее Закарпатского глубинного разлома. Этот этап

активизации проходил около 25–30 млн лет назад и был обусловлен подъемом астеносферы и перестройкой литосферы [1, с. 10].

С учетом истории теплового и геологического развития Карпатского региона сформировано первое приближение модели.

Для определения значения  $T_0$  принимается отсутствие мантийных источников тепла под Карпатами и Закарпатским прогибом и предполагается однородное нагревание исследуемого региона. Кроме того, деформации, вызванные однородным нагреванием однородной среды, считаются пренебрежимо малыми. Иными словами, температура  $T_0$  для каждого узла конечно-элементной сетки рассчитывалась при мантийном тепловом потоке  $q_1 = 25 \text{ мВт/м}^2$ ,  $q_2 = q_3 = 15 \text{ мВт/м}^2$  (рис. 1).

Анализ термического режима Карпатского региона базируется на геологических и геотермических данных вдоль геотраверса II, пересекающего Закарпатский прогиб, Карпаты, Предкарпатский прогиб и Восточно-Европейскую платформу [3, с. 67].

Для верхних слоев геотермической модели Карпатского региона теплопроводность горных пород  $k$  и генерация в них радиогенного тепла  $Q$  заданы на основе экспериментальных данных [1, с. 10].

На верхней поверхности модели задано граничное условие Дирихле для Закарпатского прогиба  $T = 12^\circ\text{C}$ , для Карпат  $T = 6^\circ\text{C}$  и в области Предкарпатского прогиба  $T = 9^\circ\text{C}$ . Значения мантийной составляющей теплового потока определены с помощью вычислительного эксперимента (рис. 1):  $q_1 = 70 \text{ мВт/м}^2$ ;  $q_2 = 30 \text{ мВт/м}^2$ ;  $q_3 = 15 \text{ мВт/м}^2$ .

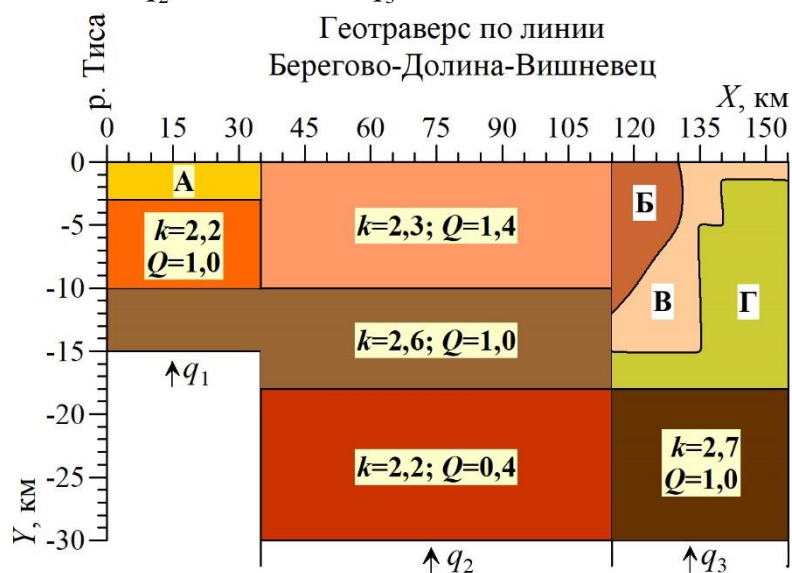


Рис. 1. Геотермическая модель Карпатского региона

A –  $k = 2,0 \text{ Вт/(м·К)}$ ;  $Q = 1,2 \text{ мкВт/м}^3$ ; B –  $k = 2,0 \text{ Вт/(м·К)}$ ;  $Q = 1,4 \text{ мкВт/м}^3$ ;  
V –  $k = 1,7 \text{ Вт/(м·К)}$ ;  $Q = 1,4 \text{ мкВт/м}^3$ ; Г –  $k = 2,4 \text{ Вт/(м·К)}$ ;  $Q = 0,8 \text{ мкВт/м}^3$

Результаты расчетов температур и тепловых потоков показаны на рис. 2. Данные о распределении температур в регионе являются исходной информацией для расчета термоупругих напряжений и перемещений.

При решении задач теплопроводности и термоупругости использовались совместные конечно-элементные сетки.

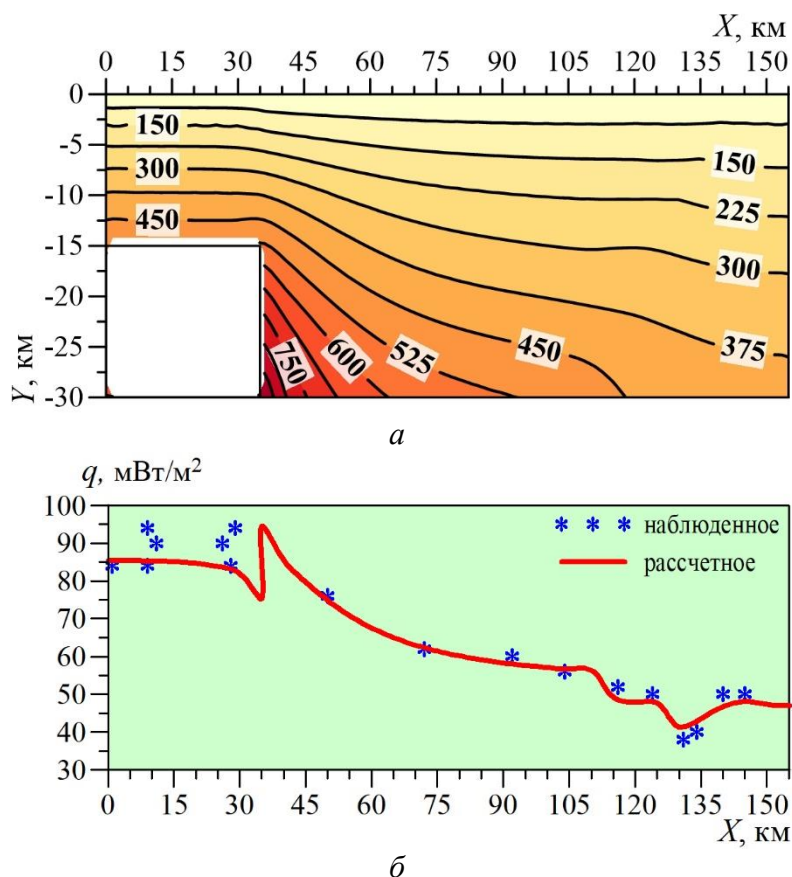


Рис. 2. Тепловая модель Карпатского региона:  
 а – распределение температуры;  
 б – распределение поверхностного теплового потока

Для плоского напряженного состояния в элементе изотропного материала, который подвержен изменению температуры на  $\Delta T$  с коэффициентом теплового расширения  $\alpha$ , можно записать

$$\varepsilon_0 = \begin{bmatrix} \alpha \Delta T^e \\ \alpha \Delta T^e \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

т.к. при тепловом расширении (сжатии) не возникает сдвиговой деформации [8, с. 64].

Напряжения и деформации связаны между собой следующим соотношением

$$\sigma = \mathbf{D}(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (2)$$

где  $\mathbf{D}$  – матрица упругости, отражающая свойства материала (модуль Юнга и коэффициент Пуассона).

Уравнение (2) действительно тогда, когда породы литосферы ведут себя упруго в течение миллионов лет. Таким образом, для определения

максимальных температур, при которых (2) верно, необходимо найти мощность упругой литосферы.

В геофизической литературе температура основания упругого слоя названа упругой «блокирующей температурой»  $T_e$  [9, с. 10256; 10, с. 378].

Породы литосферы, нагретые до некоторой температуры  $T > T_e$ , не могут вносить существенного вклада в поле тепловых напряжений, так как напряжения будут высвобождаться пластично.

Однако есть и другие оценки  $T_e$ .

В работах [10, с. 388; 11, с. 3705] отмечена очевидная корреляция между упругой мощностью океанической литосферы и глубиной залегания 450°C–изотермы, рассчитанной из модели остывания спрединговой океанической плиты.

Приложение термической и термомеханической моделей океанической литосферы к континентальной невозможно [12, с. 521].

Отмечаемая в океанической литосфере корреляция между тепловым потоком и возрастом структур, а также между мощностью упруго-вязкого слоя и характерными температурами на континентах, имеет более сложный характер. Авторы [12, с. 522] пришли к выводу, что упругая мощность соответствует глубинам с разными изотермами: от 300°C до 700°C.

Предельное значение  $T_e$  для океанической литосферы составляет 700–800°C [9, с. 10259].

Температура в области источника землетрясения является важным фактором определения, происходит ли деформация сейсмически или нет. Максимальные температуры, при которых происходят землетрясения в земной коре, находятся в пределах  $350 \pm 100^\circ\text{C}$ , в мантии –  $700 \pm 100^\circ\text{C}$  [13, с. 4213].

Большинство околохребтовых землетрясений имеют фокальные глубины между Мохо и глубиной залегания 800°C – изотермы [9, с. 10257].

В Закарпатском прогибе магнитуда сильнейших землетрясений соответствует 4,7–5,3, глубина их очагов не превышает 10 км [4, с. 10]. Температура на этих горизонтах достигает 500°C (рис. 2, а).

Второе приближение термоупругой модели Карпатского региона заключается в следующем. Среда считается проводником термоупругих напряжений до глубины залегания 500°C–изотермы. Именно из этих соображений выбрана нижняя граница модели.

В областях перехода от Закарпатского прогиба к Карпатам на глубинах от 15 км до 30 км температура достигает 800°C. Эта зона включена в модель, однако накопленные в ней термоупругие напряжения могут высвобождаться пластично.

Для двумерных задач механики твердого тела на основе принципа минимума потенциальной энергии можно получить следующий функционал

$$\Pi = \int_V \frac{1}{2} \varepsilon^T \sigma dV. \quad (3)$$

Для конечно-элементного разбиения выражение (3) может быть записано в виде

$$\Pi^e = \sum_{e=1}^l t_e \int_{\Omega_e} \frac{1}{2} \varepsilon^T \sigma d\Omega_e,$$

где  $l$  – общее число элементов в системе;  
 $t$  – ее толщина элементной подобласти;  
 $\Omega_e$  – элементная подобласть.

Дифференцируя элементный вклад  $\Pi^e$  по перемещениям узлов сетки  $\delta$  и проводя суммирование по всем элементам, получим систему алгебраических уравнений

$$\mathbf{K}\delta = \mathbf{F}_0, \quad (4)$$

где  $\mathbf{K}$  – матрица жесткости;

$\mathbf{F}_0$  – силы в узлах, возникающие при начальной деформации.

Уравнение (4) позволяет получить решение для перемещений. Из соотношений (1) и (2) можно получить следующее выражение для напряжений

$$\sigma = \mathbf{D}\mathbf{B}\delta - \mathbf{D}\varepsilon_0. \quad (5)$$

Предполагается, что напряжения внутри элементов постоянны и приложены к центру тяжести элемента. Матрица  $\mathbf{B}$  определяется, если известны функции формы и узловые смещения.

Упругие свойства среды (модуль Юнга  $E \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона  $\nu$ , коэффициент линейного расширения  $\alpha \cdot 10^{-50}$ С), указанные на рис. 3, заданы на основе обобщенных данных [14, с. 130].

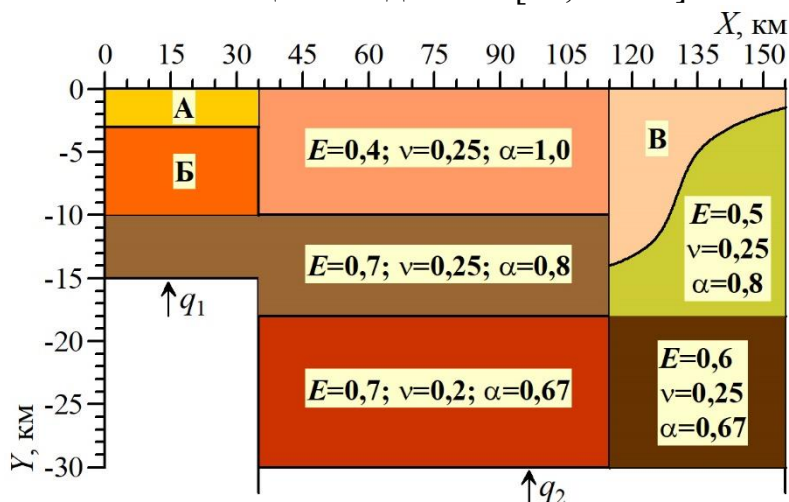


Рис. 3 Термоупругая модель Карпатского региона:

А –  $E = 0,2$ ,  $\nu = 0,2$ ,  $\alpha = 1,0$ ;

Б –  $E = 0,4$ ,  $\nu = 0,25$ ,  $\alpha = 1,0$ ;

В –  $E = 0,3$ ,  $\nu = 0,2$ ,  $\alpha = 1,0$

Без введения минимального числа известных перемещений решение системы (4) невозможно, так как в этом случае перемещения будут определяться через силы не единственным образом. Математически этот физически очевидный факт означает, что матрица  $[\mathbf{K}]$  окажется сингулярной, т.е. не поддающейся обращению.



Выбор известных перемещений или «закрепление» модели зависит от конкретной геодинамической обстановки.

Задание известных нулевых перемещений в Карпатском регионе несколько затруднительно. В таких ситуациях на помощь приходит вычислительный эксперимент. Расчеты проводились для модели «закрепления», показанной на рис. 4.

Результаты расчетов термоупругих напряжений  $\sigma_{yy}$  представлены на рис. 5. Напряжения  $\sigma_{xx}$  имеют аналогичный характер распределения. Напряжения растягивающего типа  $\sigma_{yy}$  и  $\sigma_{xx}$  являются одинаковыми, так как «закрепление» модели не влияет на значения термоупругих напряжений. Это следует из формулы (5).

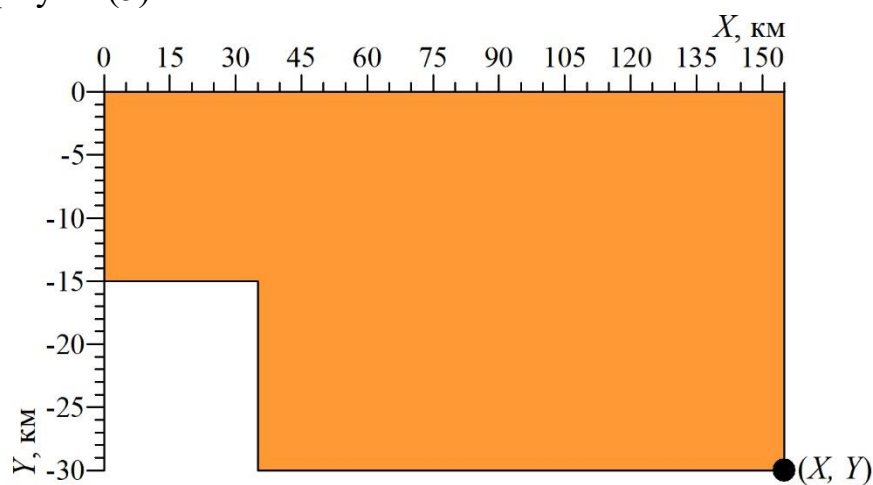


Рис. 4. Задание нулевых перемещений: модель закреплена в одной точке в направлениях оси X и оси Y

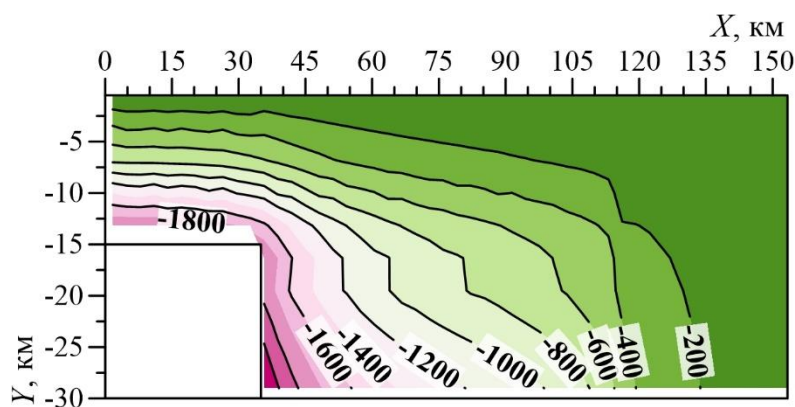


Рис. 5. Распределение термоупругих напряжений

Максимальные значения  $\sigma_{yy}$  (1,5–2 кбар) находятся в области Закарпатского прогиба и Складчатых Карпат. Восточно-Европейская платформа характеризуется низкими значениями напряжений (5–240 бар).

Перемещения узловых точек среды для модели показаны на рис. 6. Знак «минус» в направлении оси X означает, что среда движется в сторону, противоположную оси X (рис. 6, а).

В свою очередь, знак «минус» в направлении оси  $Y$  означает, что движение среды происходит в сторону оси  $Y$ . Значения перемещений даны в метрах.

Земная кора исследуемого региона испытывает растяжение, максимальное значение которого наблюдается в Закарпатском прогибе.

Опускание среды происходит в области перехода от Закарпатского прогиба и непосредственно под Карпатами (рис. 6, б).

В направлении к Восточно-Европейской платформе вертикальные перемещения земной коры плавно уменьшаются.

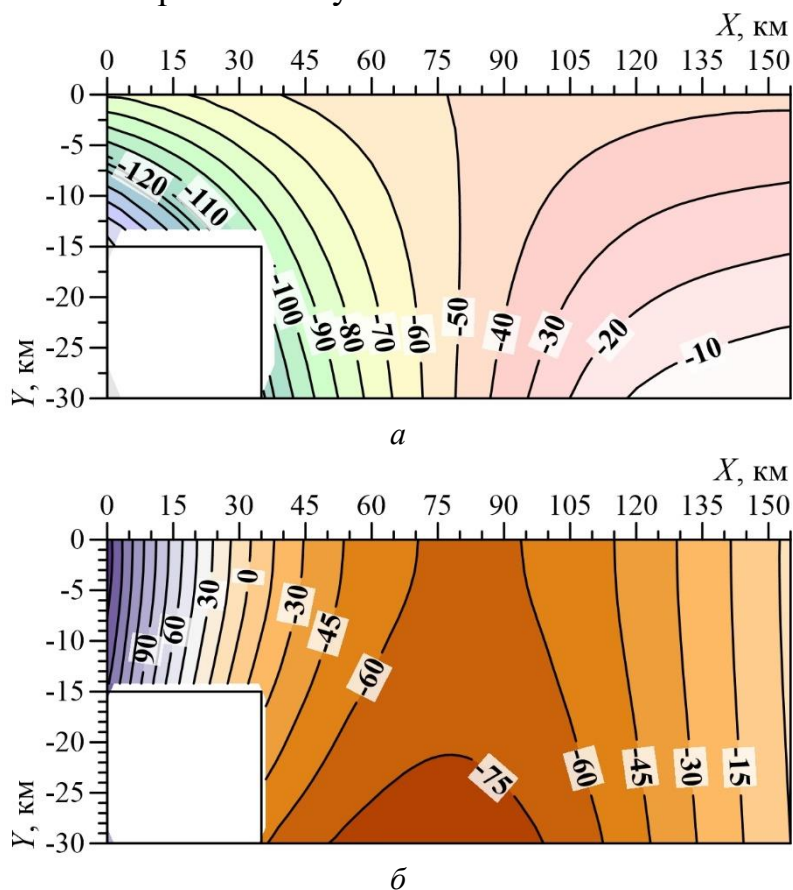
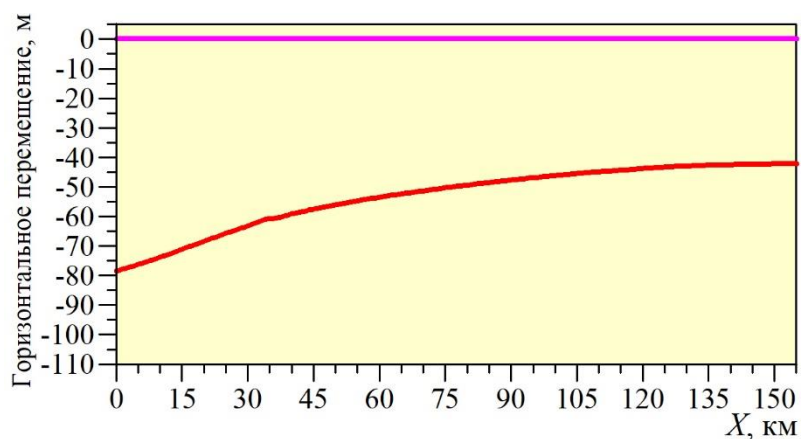


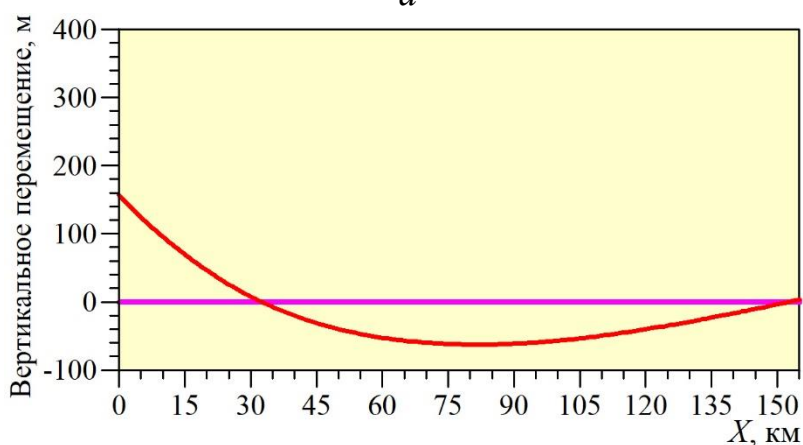
Рис. 6. Распределение перемещений:  
 а – перемещения в направлении оси  $X$  ;  
 б – перемещения в направлении оси  $Y$

На рис. 7 представлены горизонтальные и вертикальные перемещения земной поверхности.

Оценка чисто термоупругого вклада в напряженное состояние земной коры Карпатского региона показывает, что величины тепловых напряжений достигают предела прочности пород 1,5 кбар. Хотя величины максимальных смещений незначительны: 200-300 м в вертикальном направлении и 70-80 м в горизонтальном.



*a*



*б*

Рис. 7. Перемещение поверхности земной коры для моделей 1, 2, 3:

*a* – горизонтальное перемещение;

*б* – вертикальное перемещение

Полученное количественное описание режима термоупругих напряжений и перемещений не учитывают источников напряжений иной природы, которые могут существенно изменить поле тепловых напряжений.

### Список литературы

1. Кутас Р.И. Тепловой поток и геотермические модели земной коры Украинских Карпат // Геофизический журнал. – 2014. – 36, №6. С. 3-27.
2. Вялов О.С., Гавура С.П., Даньш В.В. и др. История геологического развития Украинских Карпат. – К.: Наук. думка, 1981. – 180 с.
3. Литосфера Центральной и Восточной Европы: Геотраверсы I, II, V. – К.: Наук. думка, 1988. – 168 с.
4. Кутас В.В., Кендзера А.В., Омельченко В.Д., Дрогицкая Г.М., Калитова И.А. Проявления сейсмичности в XVIII-XX вв. и потенциально сейсмоопасные зоны западной части Украины // Геофизический журнал. – 2006. – 28, № 4. – С. 3-15.
5. Бахова Н.І. Обчислювальний експеримент у сучасній геофізиці // Вісник НАУ. – 2009. – 40, № 3. – С. 262-270.
6. Бахова Н.І. Термопружні напруження в неоднорідних геологічних середовищах складного обрису // Вісник НАУ. – 2010. – 42, № 1. – С. 70-77.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 246 с.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
9. Bratt S.R., Bergman E.A., Solomon S.C. Thermoelastic stress: how important as a course of earthquakes in young oceanic lithosphere // J. Geophys. Res. – 1985. – 90. – С. 10249-10260.

10. McNutt M.K., Menard H.W. Constraints on yield strength in oceanic lithosphere derived from observations on flexure // *Geophys. J. R. astron. Soc.* – 1982. – 71, №2. – С. 363-394.
11. Bodine J.H., Steckler M.S., Watts A.B. Observations of flexure and the rheology of the oceanic lithosphere // *J. Geophys. Res.* – 1981. – 86. – С. 3695-3707.
12. Willett S.D., Chapman D.S., Neugebauer H.J. A thermomechanical model of continental lithosphere // *Nature.* – 1985. – 314, № 6011. – С. 520-523.
13. Chen W.P., Molnar P. Focal depth of intracontinental and intraplate earthquakes and their implications for the thermal and mechanical properties of the lithosphere // *J. Geophys. Res.* – 1983. – 88. – С. 4183-4214.
14. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. – М.: Мир, 1985. – 374 с.

## ОБЗОР ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

П.Ю. Бучацкий, А.А. Мугу

*butch\_p99@mail.ru*

*Адыгейский государственный университет, Россия, г. Майкоп*

**Аннотация.** В статье дан обзор современных топливных элементов. Рассмотрены сравнительные характеристики топливных элементов. Использование топливных элементов в сочетании с возобновляемыми источниками энергии обеспечивает гибкость энергетической инфраструктуры.

**Ключевые слова.** Возобновляемые источники энергии, солнечные электростанции, ветровые установки, гидроэлектростанции, топливные элементы.

С каждым годом потребность людей в электроэнергии растёт с огромной скоростью, но с такой же скоростью растёт и беспокойство экологов об окружающей среде и причины весьма справедливы. Но альтернативы ископаемому топливу не могут полностью удовлетворить аппетит всех потребителей. Итак, какие есть альтернативы сжиганию ископаемого топлива? Такой альтернативой являются возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и топливные элементы, что подтверждается растущей конкуренцией между ее традиционными составляющими - газом, нефтью, углем, атомным сырьем и возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) - солнечной, ветровой, биомассой, термальной и гидроэнергией, вырабатываемой небольшими станциями.

Рассмотрим основные виды возобновляемой энергии [1, 2].

**Солнечные электростанции** - преобразуют световую энергию огромного природного термоядерного реактора в космосе, находящегося в миллионах километров от нашего дома. Звучит так, будто и смысла нет развивать другие источники электроэнергии, но тут есть один нюанс - производство фотоэлементов дорого и их эффективность оставляет желать лучшего. Мощность солнечного излучения, прошедшего через атмосферу составляет около киловатта на квадратный метр, но КПД (коэффициент полезного действия) фотоэлементов разнится от 10% до 45% что говорит о том, что даже в лучшем случае мы получим лишь 500 ватт на квадратный метр и это если все электростанции будут расположены в районе экватора, что не делает нам погоды, кстати, учесть её и мы получим результат ещё хуже.

**Ветровые установки** - ветер разгоняет лопасти, которые в свою очередь вращают генератор, просто и чисто, но также есть свои особенности. Ветропарки занимают большие площади и энерговыработка также сильно зависит от погоды. Ясное небо может означать что ветер будет слабым, что в свою очередь означает уменьшенный выход энергии, но выработка всё равно есть, а вот в бурную погоду ветер может быть слишком силён, что вынудит обслуживающий персонал отключить генераторы, так как ветер может привести к их разрушению. Ещё один недостаток таких генераторов в

хаотичной природе ветра, т. е. электростанция не сможет обеспечить стабильный поток энергии, а часы пикового потребления приходится на определённое время дня.

**Гидроэлектростанции** - турбину генератора разгоняют притягиваемые нашей планетой водные массы. Данный вид электростанций имеет высокую энерговыработку, относительно простоту в производстве и стабильный выход энергии, но очень сильно зависит от местоположения. От фактора размещения ГЭС зависит, и энерговыработка, и стабильность, и стоимость, все факторы. Это закрепляет ГЭС в очень узкой нише.

Топливный элемент (ТЭ) или топливная ячейка – электромеханическое устройство, подобное гальваническому элементу, которое отличается тем, что вещества для электромеханической реакции подаются извне (в отличие от ограниченного количества энергии, запасенного в гальваническом элементе или аккумуляторе) [3].

Топливные элементы представляют собой очень эффективный, надежный, долговечный и экологически чистый способ получения энергии. В настоящее время топливные элементы все активней используются в самых разных областях - как стационарные электростанции, автономные источники тепло- и электроснабжения зданий, двигатели транспортных средств, источники питания ноутбуков и мобильных телефонов.

Рассмотрим некоторые топливные элементы.

**1. PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Proton Exchange Membrane Fuel Cell)** – топливные элементы с полимерной мембраной на основе фторсульфоновой кислоты, также называемые протонообменными мембранами. Эти топливные элементы используют только водород в качестве топлива, но есть установки со встроенными камерами риформинга (риформинг - преобразование топлива). Посредством риформинга можно расширить количество используемых видов топлива до природных газов и спиртов. Данные топливные элементы имеют высокую выходную мощность и относительно невысокую температуру реакции, но из недостатков выделяется высокая чувствительность к чистоте водорода и использование дорогих катализаторов. Основное использование данных видов топливных элементов нашлось в транспортной промышленности и в мобильных электростанциях.

**2. AFC (Alkaline Fuel Cell)** – щелочные топливные элементы. В качестве электролита в щелочных элементах используется концентрированный гидроксид калия или его водный раствор, а основным материалом для изготовления электродов является никель. Щелочные элементы значительно уступают полимерным топливным элементам по удельной мощности, вследствие чего их габариты (при сравнимых характеристиках) значительно больше. В традиционных AFC в качестве топлива должен использоваться чистый водород, в качестве окислителя – чистый кислород. В этом и состоит их основной недостаток, поскольку содержание в топливе или окислителе примесей углекислого газа приводит к карбонизации щелочи. Преимуществами всего класса AFC является низкая себестоимость их производства, возможность использования более дешевых никелевых и

серебряных катализаторов, а также абсолютная экологическая чистота горячей воды, получаемой в качестве отходов. Компании-производители: Astris Energi Inc, (Канада), UTC Power (США).

**3. PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)** – топливный элемент, в котором в качестве электролита используется жидкая фосфорная кислота. PAFC применяются на крупных стационарных объектах и служат для производства как электроэнергии, так и теплоты. Работают эти ТЭ на водороде, однако, требования по его чистоте значительно менее строгие, чем в случае использования PEMFC. В большинстве случаев водород получают из природного газа или биогаза. Окислительно-восстановительный процесс протекает при температурах 150–220°C. Эффективность процесса выработки электроэнергии оценивается в 37–42% и 85% при использовании отводимой тепловой энергии. Сегмент PAFC считается самым «зрелым» среди всех технологий топливных элементов. PAFC стабильно развивается, благодаря возможности использовать водород с примесями. Суммарная мощность всех мировых установок, функционирующих на основе жидкой фосфорной кислоты, превышает 75 МВт. Инновационным можно считать несколько опытов применения PAFC в автомобильных приложениях. Мировым лидером по использованию технологии считается американская компания UTC Power (США), работающая также с другими технологиями (PEMFC, MCFC). Среди ведущих производителей стоит отметить компании Южно-Азиатского региона: Fuji Electric (Япония) и Korea Gas (Корея).

**4. SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)** – топливный элемент с твердым керамическим электролитом. Отличие от прежде рассмотренных видов заключается в высоких температурах реакции (650–1000 °C) и разнообразии применяемого топлива: природный газ, водород, пропан, биогаз, другие углеродосодержащие топливные элементы. КПД электрохимического преобразования – 50%, с учетом тепловой энергии – до 80%. Основной сферой применения этой технологии считается производство источников электрической и тепловой энергии для различных жилых, административных и прочих помещений. Некоторые компании ведут разработки систем для промышленного использования. SOFC широко применяются в качестве первичных и портативных резервных источников энергии большой емкости. В последнее время ведутся разработки по использованию SOFC в автомобильной промышленности, однако, в отличие от PEMFC речь идет только о вспомогательных системах, а не о двигателе. Совместно с PEMFC технология активно используется в малых стационарных приложениях – 10–15% производимых установок. В крупных стационарных приложениях есть опыт производства коммерческих установок мощностью 1 МВт. Некоторые компании-производители: Acumentrics (США), Ceramic Fuel Cells Limited (CFCL, Австралия), Mesoscopic Devices LLC (США), NanoDynamics Energy, Inc. (США), Rolls-Royce (США), Siemens Westinghouse (Германия).

**5. MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)** – топливный элемент на основе расплавленного карбоната (соли натрия или лития). Топливные элементы данного типа также функционируют при высоких температурах – 600–700 °C.

Такие рабочие температуры позволяют использовать топливо непосредственно в самой ячейке. Топливные элементы на основе расплавленного карбоната требуют значительного времени запуска и не позволяют оперативно регулировать выходную мощность, поэтому основная область их применения – крупные стационарные источники тепловой и электрической энергии. Они отличаются высокой эффективностью преобразования топлива – только электрический КПД до 60 %. Широкое промышленное использование технологии обуславливают три фактора: электрохимические процессы в MCFC не требуют использования дорогих катализаторов; в качестве топлива может использоваться целый ряд натуральных и синтетических топлив; высокие температуры протекания процессов не требуют наличия дополнительного реформера для преобразования топлива. Недостаток MCFC заключается в том, что они не могут работать на чистом водороде, а высокие температуры и химические реакции могут привести к коррозии и ускорить процесс износа элементов конструкции. Некоторые компании-производители: Ansaldo Fuel Cells SpA (Италия), FuelCell Energy (США), GenCell Corporation (США), MTU CFC Solutions GmbH (Германия).

**6. MAFC (Metal Air Fuel Cells)** – элементы на твердом топливе. В качестве электролита в этих ТЭ используется гидроксид калия (KOH), а топливом могут служить различные металлы: алюминий, магний, кальций, цинк, железо. Предполагаемые сферы применения технологии – малые стационарные объекты и автомобилестроение. На сегодняшний день данное направление остается скорее теоретическим, поскольку ТЭ на твердом топливе практически не выпускаются.

Таблица 1

Сравнительные характеристики топливных элементов

Аббревиатура	Тип электролита	Тип топлива	КПД/t°
PEMFC	Полимерная мембрана	Водород,	35-70% / 80°
AFC, DBFC	Гидроксид калия	Водород	50-60% / от 25° до 250°
PAFC	Фосфорная кислота	Углеводороды, водород	от 37% до 85% / 150-220°
SOFC	Керамика	Углеводороды, водород	50-80% / 650-1000°
MCFC	Расплав карбоната	Углеводороды, водород	50-85% / 650°
MAFC	Гидроксид калия	Металлы	80% / 25-750°

Модульный принцип устройства топливных элементов означает, что мощность электростанции на топливных элементах можно увеличить, просто добавив еще несколько каскадов. Это обеспечивает минимизацию коэффициента недоиспользования мощности, что позволяет лучше приводить в соответствие спрос и предложение. Поскольку КПД блока топливных элементов определяется производительностью отдельных элементов,



небольшие электростанции на топливных элементах работают так же эффективно, как и большие. Кроме того, сбросное тепло от стационарных систем на топливных элементах может быть использовано на обогрев воды и помещений, еще более увеличивая эффективность использования энергии.

Использование топливных элементов в сочетании с возобновляемыми источниками энергии обеспечивает гибкость энергетической инфраструктуры, что важно для отдаленных и сельских районов, при отсутствии доступа к линиям электропередач [4].

#### **Список литературы**

1. Бучацкий, П.Ю. Перспективные технологии преобразования возобновляемой энергии / П.Ю. Бучацкий // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2012. – С. 6-8.

2. Бучацкий, П.Ю. Обзор ветроустановок / П.Ю. Бучацкий, В.Е. Авдеев // Материалы V Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». – 2019, С. 90-93.

3. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. – М.: Издательство МЭИ, 2005, - 280 с.

4. Бучацкий, П.Ю. Модернизация системы электро- и теплоснабжения автономного потребителя с использованием возобновляемых источников энергии / П.Ю. Бучацкий, А.В. Шопин // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2019. №1(236)– С. 88-92.

## **ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРОКОПТЕРОВ**

**<sup>1,2</sup>М.И. Варенцов, <sup>1,2</sup>И.А. Репина, <sup>2</sup>А.Ю. Артамонов, <sup>1</sup>П.И. Константинов,  
<sup>1</sup>В.М. Степаненко, <sup>2</sup>А.А. Шестакова, <sup>1</sup>М.А. Локощенко, <sup>3</sup>А.В. Соромотин,  
<sup>4</sup>А.С. Печкин**

*tvar91@gmail.com*

*<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Россия, г. Москва*

*<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия, г. Москва*

*<sup>3</sup>Тюменский государственный университет, Россия, г. Тюмень*

*<sup>4</sup>Научный центр изучения Арктики, Россия, г. Салехард*

Данная работа посвящена обзору возможностей применения мультироторных беспилотных летательных аппаратов (квадрокоптеров) для метеорологических измерений в пограничном слое атмосферы на примере опыта авторского коллектива.

Атмосферный пограничный слой (АПС) – это нижняя часть атмосферы, напрямую взаимодействующая с поверхностью Земли [1]. Информация о процессах в АПС и его структуре важна в самых разных задачах, включая обеспечение безопасности авиационных полетов, прогноз погоды и экологических условий, разработку и уточнение физических теорий АПС и соответствующих параметризаций для моделей погоды и климата. Вопрос о структуре и динамике АПС особенно актуален для специальных условий, плохо описываемых существующими теориями – например, для сильно устойчивой стратификации атмосферы или для неоднородных ландшафтов, таких как береговые зоны, урбанизированные территории и т.д. Для мониторинга АПС используются различные подходы, включая мачтовые наблюдения, радиозондирование, различные приборы дистанционного зондирования (содары, лидары, микроволновые профилемеры и т.д.), однако их использование ограничено высокой стоимостью оборудования и его обслуживания, а также низкой мобильностью, что особенно важно для полевых экспериментальных исследований.

Новые возможности для метеорологических измерения в АПС открывает стремительное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Существует два основных типа БПЛА: самолеты и многороторные вертолёты (чаще всего создаваемые по схеме квадрокоптера или октокоптера). Первые попытки использовать БПЛА для исследования атмосферных процессов были предприняты еще в 1970е годы [2]. Дальнейшее развитие компьютерных технологий, миниатюризация датчиков и другие технологические достижения вывели БПЛА, в первую очередь самолетного типа, «на передовую» экспериментальных атмосферных исследований [3–6]. Мультироторные БПЛА стали активно развиваться значительно позже БПЛА самолетного типа, но в настоящее время являются более массовыми и популярными устройствами, нашедшими свое применение в самых разных задачах, включая и исследования в области метеорологии и физики

атмосферы. Их ключевые преимущества - простота управления, маневренность, возможность взлетать и садиться в условиях ограниченного пространства, зависать или двигаться вертикально над заданной точкой. Перспективность применения мультироторных БПЛА в задачах исследования АПС в ряде исследований, в том числе в суровых условиях Арктики и Антарктики [3,7,8].

В большинстве работ по применению БПЛА для атмосферных исследований используются БПЛА не промышленного производства, а собираемые непосредственно исследовательскими группами. Это могут быть как достаточно простые модели, собранные из стандартных комплектующих, так и более сложные системы, разработанные с учетом специфики задачи атмосферных измерений, например созданная в университете Оклахомы (США) модель CopterSonde [9]. Однако, разработка и репликация таких систем требуют существенных трудозатрат. Существуют и коммерческие решения – например, модель MeeoDrone швейцарской компании MeeoMatics, однако ее стоимость составляет десятки тысяч Евро.

Альтернативой разработке собственных моделей БПЛА или приобретению специализированных коммерческих решений является использование более простых и дешевых устройств массового производства. В данной работе рассмотрен опыт авторского коллектива по использованию измерительного комплекса на базе популярной и относительно недорогой модели квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro и компактных метеорологических датчиков iMet-XF и iMet-XQ2 производства компании Intermetsystems (рис. 1). Установленные на квадрокоптере датчики обеспечивают измерение давления, температуры и влажности воздуха, яркостной температуры подстилающей поверхности. Кроме того, по данным об углах наклона квадрокоптера, доступных в его полетных логах, возможно получение оценки скорости и набавления ветра [10]. Более подробное описание разработанной измерительной системы, опыта ее использования и методов обработки данных приведено в цикле предшествующих работ авторов [11–14].

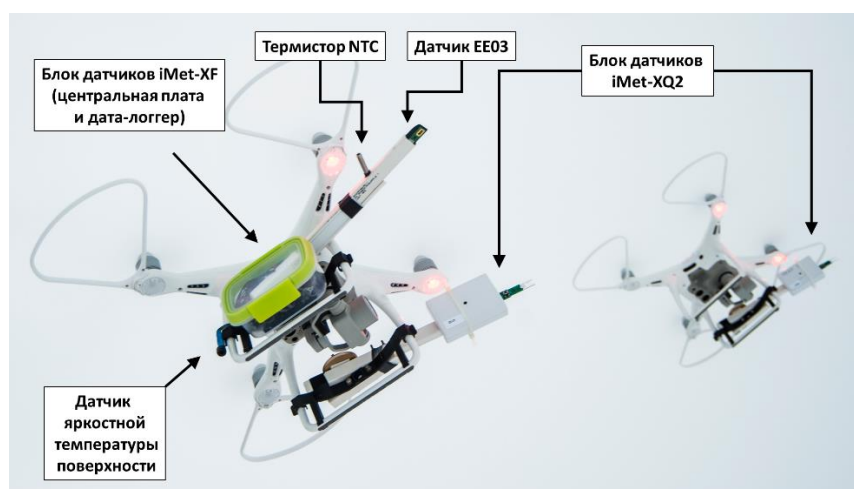


Рис. 1. Фотография двух квадрокоптеров DJI Phantom 4 Pro с установленными на них измерительными систем iMet-XF и iMet-XQ2

Разработанной измерительный комплекс на базе квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro использовался в серии полевых экспериментов в различных географических и климатических условиях, от Арктики до южных регионов России. Решаемые научные задачи включали мониторинг АПС в рамках измерительных кампаний, направленных на изучение процессов взаимодействия атмосферы с поверхностью, исследование приземных температурных инверсий, городских «островов тепла» в Арктике, конвективных пограничных слоев над незамерзающими полыньями.

Для оценки точности получаемых данных проведено их сравнение с другими видами измерений. Результаты вертикального температурного зондирования с помощью квадрокоптера сравнивались с наблюдениями высотной метеорологической мачты в Обнинске [11], с измерениями температурных профиломеров МТП-5 [11,12] и экспериментальными измерениями с использованием термокосы. Все эти эксперименты показали, что результаты измерений с использованием квадрокоптеров объективно отражают условия температурной стратификации в АПС. При этом для условий устойчивой стратификации с интенсивными инверсиями температуры метод измерений с использованием квадрокоптера оказывается во многом выигрышной методов дистанционного зондирования, так как значительно детальнее разрешает резкие градиенты температуры. Это показывает пример сравнения с данными профиломера МТП-5 (рис. 2).

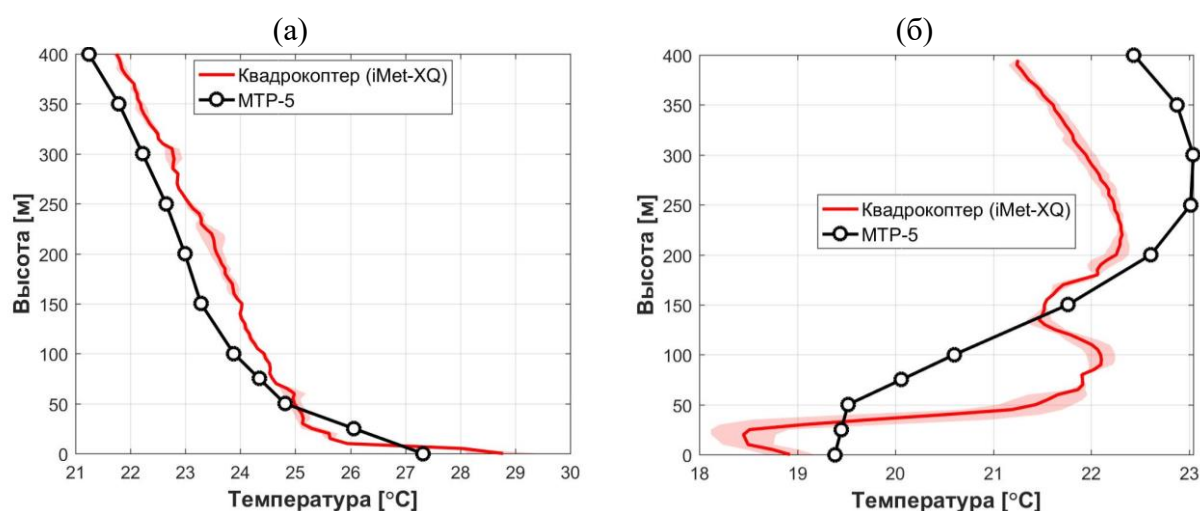


Рис. 2. Сравнение профилей температуры по данным вертикального зондирования с использованием квадрокоптера и микроволнового температурного профиломера МТП-5 над однородным степным ландшафтом в Цимлянске днем в срок 11:20 11 августа 2020 г. (а) и в срок 6:30 10 августа 2020 г. (б). Полупрозрачная заливка обозначает диапазон изменчивости между данными измерений в ходе подъема и спуска квадрокоптера

Для верификации получаемых с использованием квадрокоптера профилей скорости и направления ветра проведено их сравнение данными ветрового акустического (содарного) зондирования атмосферы в метеорологической обсерватории МГУ [13] и на базе ИФА РАН в Цимлянске [12], с данными ветрового шаропилотного ветрового зондирования [14].

Дополнительно проведены эксперименты, в ходе которых квадрокоптер зависал рядом с высокочастотным акустическим анемометром [12,14]. Все эти сравнения показали, что измерения с использованием квадрокоптера позволяют получать адекватную оценку вертикального профиля и направления ветра. Это демонстрируют примеры сравнения с данными содаров Metec в МГУ, Latan-3 и Scintec в Цимлянске (рис. 3). Это же подтверждают и результаты сравнения с данными шаропилотного зондирования и измерениями акустических анемометров, детально проанализированные в статье [14]. При этом показана важность калибровка алгоритма восстановления профиля скорости ветра.

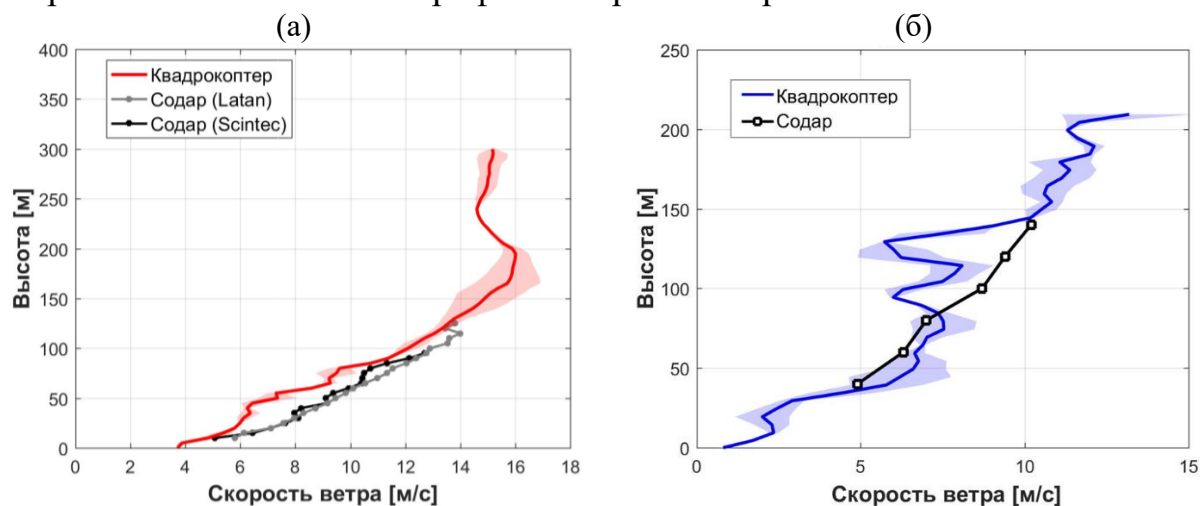


Рис. 3. Сравнение профилей скорости ветра по данным вертикального зондирования с использованием квадрокоптера с измерениями содаров Latan-3 и Scintec в Цимлянске 8 августа 2020 г., с изменениями содара Metec на территории метеорологической обсерватории МГУ 18 февраля 2020 г.

Опыт применения разработанной измерительной системы в различных экспериментальных кампаниях позволил выработать ряд стандартных сценариев ее использования. Такие сценарии включают в себя вертикальное зондирование; горизонтальные разрезы над неоднородной поверхностью – например, над границей льда и незамерзающей полыньи [11]; использование квадрокоптера режиме «летающей метеостанции» для получения временных рядов метеовеличин в труднодоступной точке (например, внутри конвективного пограничного слоя над полыньей).

Относительно невысокая стоимость измерительной системы на базе квадрокоптеров DJI Phantom 4 Pro и простота ее использования позволяют достаточно легко проводить измерения с одновременным использованием двух и более летательных аппаратов – например, синхронные вертикальные зондирования в двух точках в условиях неоднородного ландшафта. Такие эксперименты проводились в рамках исследования конвективного пограничного слоя над незамерзающей полыньей в Белом море (синхронное зондирование надо льдом и открытой водой), в городах Надым и Апатиты в рамках задачи изучения эффекта «острова тепла» городов Заполярья (синхронное зондирования над городом и над фоновой загородной точкой).

Примеры из экспериментов на Белом море и в Надыме на рис. 4 показывают, что положительная температурная аномалия – тепловой след полыни, или же эффект «острова тепла» – в условиях устойчивой стратификации атмосферы локализована слое толщиной около 50 м, однако существенно меняет условия приземной стратификации атмосферы. В Надыме измерения продолжаются на квазирегулярной основе с участием сотрудников Центра изучения Арктики с целью расширения выборки данных. В перспективе накопленные данные измерений позволят верифицировать и улучшить описания соответствующих процессов в моделях атмосферы.

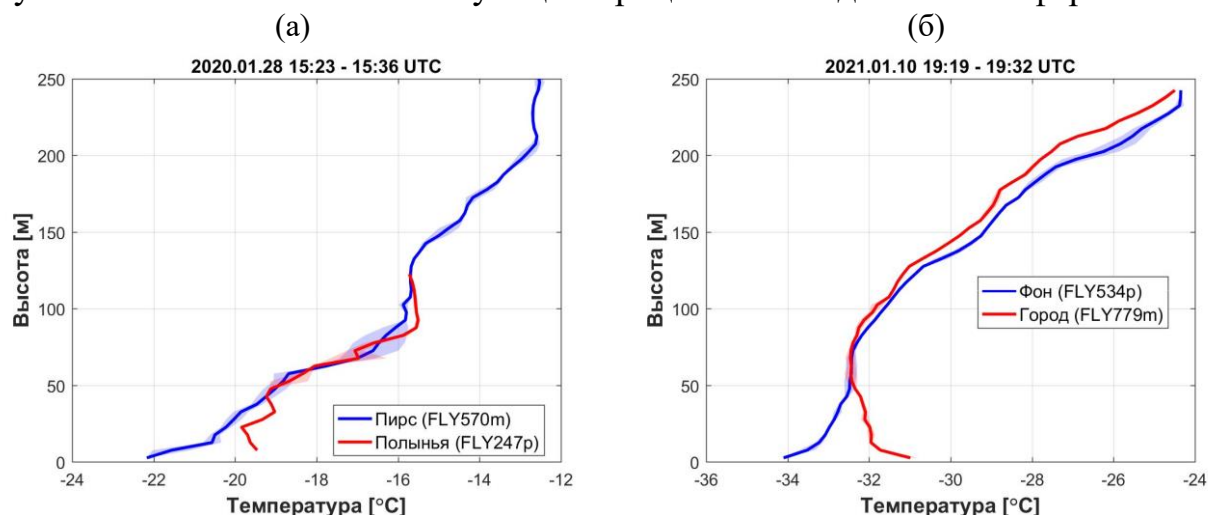


Рис. 4. Сравнение синхронно измеренных вертикальных профилей температуры надо льдом (над пирсом) и над незамерзающей полыньей на Белом море 28 января 2020 г. в срок 15:30 по UTC (а), над городом Надым и над фоновой загородной точкой (б) 10 января 2021 г. в срок 19:30 по UTC

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о надежности измерительной системы на базе популярного и относительно недорогого квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro, в том числе в суровых зимних условиях высоких широт, о востребованности подобных систем в задачах в рамках мониторинга и исследования АПС, о широком наборе сценариев использования предложенной измерительной системы.

*Измерения в городах Арктической зоны РФ выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проекты № 18-05-60126 и 20-55-71004. Измерения над береговыми зонами выполнены в рамках проектов РФФИ 20-05-00834 и 18-05-80065. Обобщение результатов и развитие измерительного комплекса ведется при поддержке проекта Российского научного фонда №21-17-00249.*

#### Список литературы

1. Oke T.R. Boundary layer climates. 2nd ed. Routledge, 1987.
2. Konrad T.G., Hill M.L., Rowland J.R., Meyer J.H. A Small, Radio-Controlled Aircraft As A Platform for Meteorological Sensors // APL Technical Digest. 1970. № December. P. 11–19.
3. Kral S., Reuder J., Vihma T., Suomi I., O'Connor E., Kouznetsov R., Wrenger B., Rautenberg A., Urbancic G., Jonassen M., Båserud L., Maronga B., Mayer S., Lorenz T., Holtslag A., Steeneveld G.-J., Seidl A., Müller M., Lindenberg C., Langohr C., Voss H., Bange J., Hundhausen M., Hilsheimer P., Schygulla M. Innovative Strategies for Observations in the Arctic

Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR)—The Hailuoto 2017 Campaign // *Atmosphere*. 2018. Vol. 9, № 7. P. 268.

4. Boer G., Ivey M., Schmid B., Lawrence D., Dexheimer D., Mei F., Hubbe J., Bendure A., Hardesty J., Shupe M.D., McComiskey A., Telg H., Schmitt C., Matrosov S.Y., Brooks I., Creamean J., Solomon A., Turner D.D., Williams C., Maahn M., Argrow B., Palo S., Long C.N., Gao R.S., Mather J. A bird's-eye view: Development of an operational ARM unmanned aerial capability for atmospheric research in arctic Alaska // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2018. Vol. 99, № 6. P. 1197–1212.

5. Reuder J., Brisset P., Jonassen M., Müller M., Mayer S. The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research // *Meteorol. Zeitschrift*. 2009. Vol. 18, № 2. P. 141–147.

6. Spiess T., Bange J., Buschmann M., Vörsmann P. First application of the meteorological Mini-UAV “M2AV” // *Meteorol. Zeitschrift*. 2007. Vol. 16, № 2. P. 159–169.

7. Jonassen M.O., Tisler P., Altstädter B., Scholtz A., Vihma T., Lampert A., König-Langlo G., Lüpkes C. Application of remotely piloted aircraft systems in observing the atmospheric boundary layer over Antarctic sea ice in winter // *Polar Res.* 2015. Vol. 34. P. 1–15.

8. Lampert A., Altstädter B., Bärfuss K., Bretschneider L., Sandgaard J., Michaelis J., Lobitz L., Asmussen M., Damm E., Käthner R., Krüger T., Lüpkes C., Nowak S., Peucker A., Rausch T., Reiser F., Scholtz A., Sotomayor Zakharov D., Gaus D., Bansmer S., Wehner B., Pätzold F. Unmanned Aerial Systems for Investigating the Polar Atmospheric Boundary Layer—Technical Challenges and Examples of Applications // *Atmosphere (Basel)*. 2020. Vol. 11, № 4. P. 416.

9. Segales A.R., Greene B.R., Bell T.M., Doyle W., Martin J.J., Pillar-Little E.A., Chilson P.B. The CopterSonde: an insight into the development of a smart unmanned aircraft system for atmospheric boundary layer research // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. Vol. 13, № 5. P. 2833–2848.

10. Neumann P.P., Bartholmai M. Real-time wind estimation on a micro unmanned aerial vehicle using its inertial measurement unit // *Sensors Actuators, A Phys.* Elsevier B.V., 2015. Vol. 235. P. 300–310.

11. Varentsov M.I., Yu Artamonov A., Pashkin A.D., Repina I.A. Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric boundary layer // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019. Vol. 231. P. 012053.

12. Репина И.А., Варенцов М., Чечин Д.Г., Артамонов А.Ю., Бодунков Н.Е., Калягин М.Ю., Живоглотов Д.Н., Шевченко А.М., Варенцов А.И., Куксова Н.Е. Использование беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя // *Инноватика и экспертиза*. 2020. Т. 30, № 2. С. 20–39.

13. Варенцов М.И., Артамонов А.Ю., Репина И.А. Зондирование атмосферы беспилотными летательными аппаратами в МО МГУ для изучения стратификации нижней атмосферы: первые результаты // *Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2018 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова* / под ред. Локощенко М.А. Москва: МАКС Пресс, 2019. С. 162–174.

14. Varentsov M., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Bogomolov V., Kuksova N., Marchuk E., Pashkin A., Varentsov A. Balloons and Quadcopters: Intercomparison of Two Low-Cost Wind Profiling Methods // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, № 3. P. 380.



## ВЛИЯНИЕ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УРОВЕНЬ ЧЁРНОГО МОРЯ В АКВАТОРИИ СУХУМСКОЙ БУХТЫ

<sup>1,2</sup>Я.В. Гицба, <sup>1,2</sup>Я.А. Экба

*yana\_aku@mail.ru*

<sup>1</sup>Абхазский государственный университет, Абхазия, г. Сухум

<sup>2</sup>Институт экологии Академии наук Абхазии, Абхазия, г. Сухум

Одним из главных гидрологических параметров является уровень моря. Изучение колебаний уровня моря необходимо для прогнозирования наводнений, нагонов и сгонов. Актуальность проблемы, связанной с изменчивостью уровня Черного моря, обусловлена задачами хозяйственного освоения береговой зоны и рядом вопросов экономического и экологического характера.

Уровень Черного моря формируется под воздействием факторов, которые приводят как к изменению объема вод, так и перераспределению его по пространству. Факторы, приводящие к изменению объема вод и объема чаши моря в Черном море – это речной сток, испарение, осадки, выпадающие над морем, водообмен с Мраморным и Азовским морями, антропогенный сток, оседание и уплотнение осадков. Основные факторы, перераспределяющие воды по пространству и времени, действующие в Черном море, – ветер; пространственно-временные изменения атмосферного давления (статическая реакция) и плотности морской воды (стерический эффект); сгонно-нагонные колебания, связанные с циркуляцией вод, возникающей в результате тангенциального трения между воздушным потоком и водной поверхностью, ограниченной береговой чертой. Эти факторы существенно изменчивы в пространстве и времени [1].

Сгонно-нагонные колебания уровня Черного моря у Абхазских берегов вызваны наличием бризовой циркуляции, которая комбинируется с горно-долинной циркуляцией воздуха. При соответствующих ветрах сгонно-нагонные колебания уровня у Кавказского побережья могут достигать 40-60 см. Сильный устойчивый ветер с берега создает сгонное течение: море уходит от берега, его уровень в данном месте понижается, иногда до 30 см за день. На смену поверхностной воде поднимается вода из глубины. При устойчивом ветре с моря наблюдается обратное явление - ветровой нагон, повышение уровня моря у берега [2].

Изменения уровня вследствие изменения давления (статическая реакция) значительно меньше изменений, обусловленных действием ветров и течений, как вдоль береговой черты, так и в открытом море (динамическая реакция). Тесная корреляционная зависимость между среднемесячными значениями атмосферного давления и уровнем моря в акватории сухумской бухты обнаруживается в феврале и составляет  $r=-0,81$ , в остальные месяцы корреляционные связи выражены слабее или не выявляются [3]. Кроме указанных процессов, определенное влияние на перераспределение объема



вод оказывают волновые процессы различного происхождения – сейши и приливные колебания.

В работе использованы данные по колебанию уровня моря (2005-2015 гг.), полученные с помощью спутниковой альтиметрии, которая относится к одному из активных методов дистанционного зондирования поверхности Земли с борта космического аппарата. Начиная с 1993 г. по настоящее время проводится постоянный мониторинг водной поверхности Мирового океана, окраинных и внутренних морей (спутники ERS 1/2, TOPEX/Poseidon, GFO-1, Jason 1/2, Envisat и др.) [2].

Годовой ход уровня моря в акватории сухумской бухты согласуется с годовым ходом речного стока с максимумом весной и минимумом зимой [4].

Уменьшение уровня моря в течение первых трех месяцев идет медленно, с апреля наклон кривых увеличивается, уровень начинает возрастать, что объясняется интенсивным поступлением в море в этот период речных вод. Максимум уровня относится к июню (6,82 см) (рис. 1).

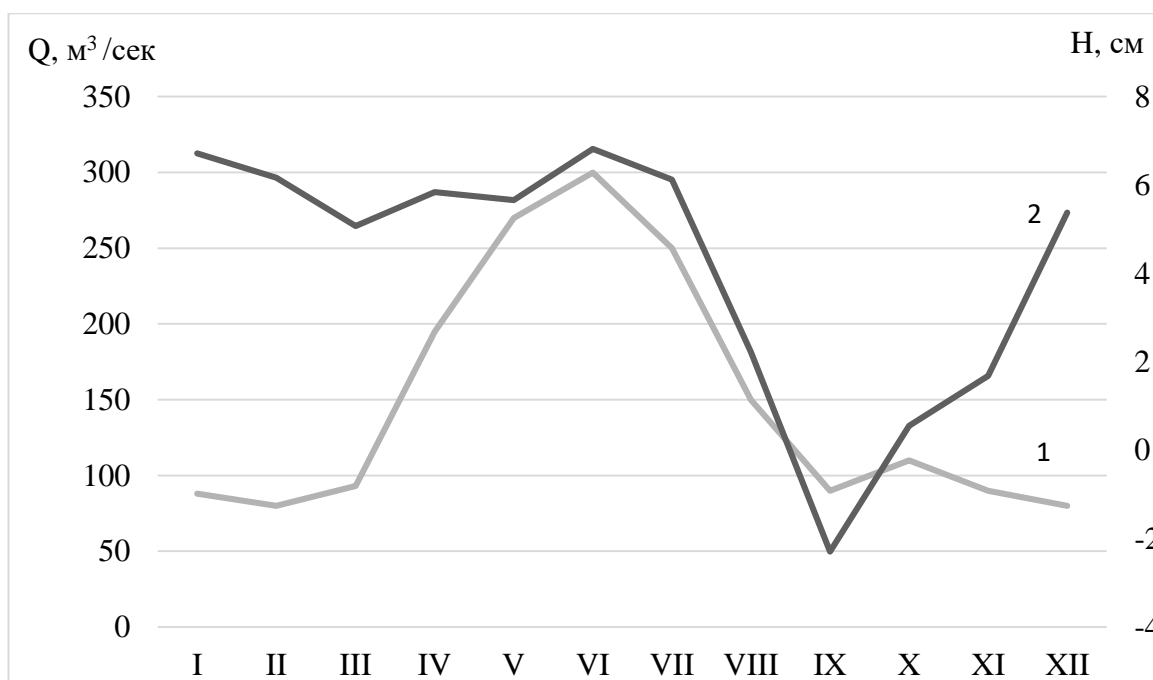


Рис. 1. Суммарный годовой сток (1) и колебания уровня моря (2) в акватории сухумской бухты

Максимальное значение уровня моря в июне совпадает с максимальным значением годового стока 300 м³/сек. С июля, в связи с уменьшением притока речных вод и увеличением испарения с поверхности моря, расход воды начинает преобладать над приходом и уровень понижается вплоть до сентября (-2,30 см). Одно из минимальных значений годового стока 90 м³/сек также наблюдается в период минимального значения уровня моря.

Период спада июль-сентябрь короче периода подъема (октябрь-январь), наклон кривых на протяжении трех месяцев спада почти один и тот же. Максимальная продолжительность подъема и спада уровня составляет 10 месяцев, минимальная – 3 месяца. Амплитуда колебания уровня по

многолетним данным составляет 43,54 см, наибольшее изменение за время подъема составляет 9,01 см, наименьшее изменение за время спада – 9,11 см.

Самый высокий коэффициент корреляции между суммарным годовым стоком и уровнем морем обнаружен в период с апреля по октябрь  $r=0,92$ , с марта по ноябрь коэффициент корреляции равен  $r=0,77$ . В зимний период корреляционная связь между параметрами не обнаруживается: в зимний период большее влияние на уровень моря оказывает нагонное течение (восточные ветра, способствующие повышению уровня моря).

Для климата Абхазии существенное значение имеет температура поверхностного слоя Черного моря, омывающего ее берега. Как известно, повышение глобальной температуры воздуха и Мирового океана приводят к таянию ледников, что вызывает повышение уровня океана и морей.

В работе приводится график многолетнего распределения температуры морской воды в период с 2005 по 2015 гг., выбран ряд, соответствующий периоду наблюдения колебания уровня моря с помощью спутниковой альтиметрии (рис. 2).

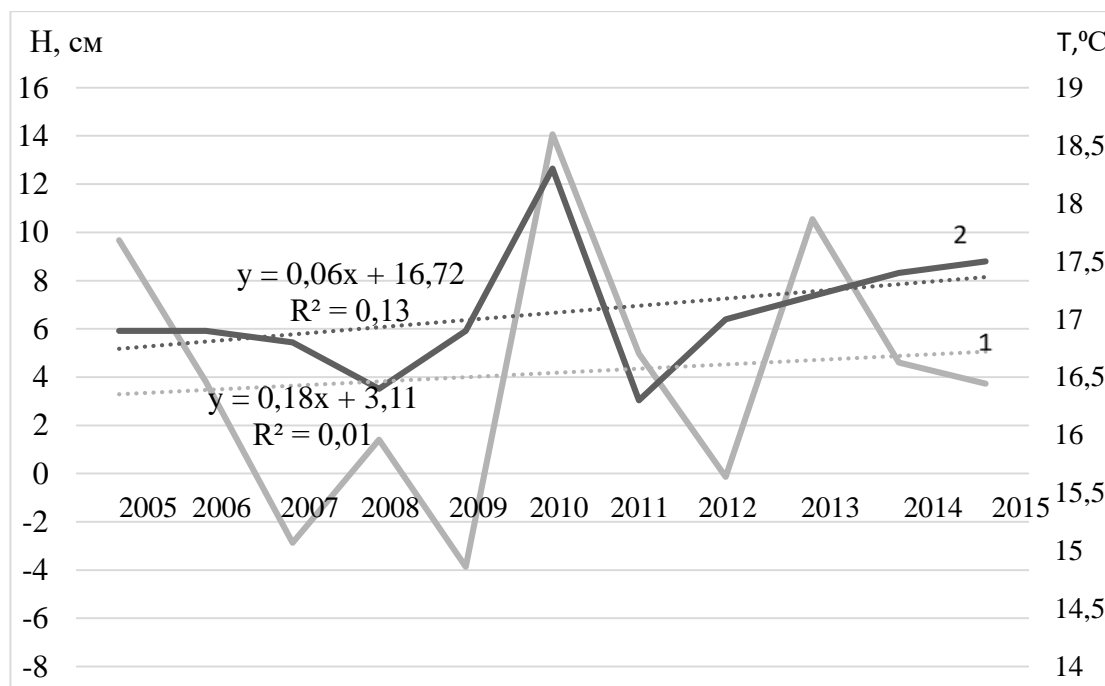


Рис. 2. Годовые значения уровня моря (1) и температуры морской воды (2)

Так, в 2010 году, наблюдалось экстремально высокое значение среднегодовой температуры воды ( $18,3^{\circ}\text{C}$ ), и в этом же году уровень моря в прибрежной зоне сухумской бухты оказался максимальным (14,1 см). В 2011 году наблюдалось самое низкое среднегодовое значение температуры морской воды ( $16,3^{\circ}\text{C}$ ). Минимальное среднегодовое значение уровня моря в 2009 году составляло  $H = -3,85$  см. Средняя многолетняя температура воды за 11 лет –  $16,6^{\circ}\text{C}$ . Температура морской воды за 11-летний период выросла на  $0,66^{\circ}\text{C}$ . В период с 2005 по 2015 гг. наблюдается тенденция повышения

уровня моря на 2,0 см ( $y = 0,18x + 3,11$ ). Среднегодовой уровень воды составляет 4,84 см.

Коэффициент корреляции между среднегодовыми значениями температуры воды и колебаниями уровня моря за 2000-2015 гг. составляет  $r=0,55$ , что говорит о некотором влиянии температуры воды на колебание уровня моря.

Согласно теории Шулейкина [5] ветры, дующие вдоль берега слева направо (лицом к морю), являются нагонными (СВ, ЮЮВ), справа налево – сгонными (ЮЗ-ССЗ).

В работе приводится таблица с результатами обработки массива данных за 20 летний период времени, с целью характеристики ветрового режима в акватории сухумской бухты и выявления его влияния на колебания уровня моря (таб.1) [3].

Таблица 1

Среднемесячная повторяемость ветра (%) по различным направлениям за 1999-2019 гг.

Мес/рум	С	СВ	СЗ	В	Ю	ЮВ	ЮЗ	З	Штиль
I	2,70	27,3	8,65	21,90	6,3	10,30	6,75	10,95	6,65
II	2,00	19,95	9,05	23,10	5,25	13,55	8,1	16,10	5,50
III	5,75	17,2	8,55	17,65	6,2	12,50	11,85	21,25	3,50
IV	1,05	10,4	11,55	14,35	5,4	12,7	16,65	26,35	4,70
V	2,95	8,05	10,10	10,85	5,55	13,30	17,25	29,05	3,80
VI	1,25	11,75	10,35	12,10	5,4	8,65	16,6	33,00	3,70
VII	1,15	10,00	7,85	13,40	5,75	12,95	19,05	28,3	4,64
VIII	1,13	11,95	5,6	11,90	5,3	10,10	13,76	32,9	7,95
IX	2,35	20,85	9,75	13,85	5,95	9,45	13,15	26,2	2,45
X	3,00	18,80	8,95	17,90	5,60	12,70	10,10	16,1	9,35
XI	2,70	29,25	7,30	17,20	5,00	16,65	13,33	11,7	4,85
XII	3,90	32,8	5,70	21,70	3,45	13,85	6,25	11,1	4,05
Сред.	2,49	18,19	8,62	16,33	5,43	12,23	12,74	21,92	5,10

Наибольшей среднегодовой повторяемостью в акватории сухумской бухты обладают ветры З направления (21,9%), наименьшей – ветры С (2,5%) направления. Сильный устойчивый ветер с берега создает сгонное течение: море уходит от берега, его уровень в данном месте понижается, на смену поверхностной воде поднимается вода из глубины. При устойчивом ветре с моря, наблюдается обратное явление - ветровой нагон, повышение уровня моря у берега.

Максимальная повторяемость ветров северо-восточного горизонта, вызывающих нагонные процессы, наблюдается в холодный период времени (26,68%) и способствует повышению уровня моря в указанный период ( $H=6,09$  см). Северо-западные ветры, способствующие образованию сгонных процессов и, следовательно, понижению уровня моря, имеют наименьшую повторяемость в теплый период времени (7,7%), когда и уровень моря понижается. Наибольшая сезонная повторяемость безветренных дней приходится на осенний период (5,5%), наименьшая – на весенний (4,0%).

Работа по объему материала и степени анализа позволяет дать характеристику режима колебаний уровня моря и других гидрологических параметров акватории сухумской бухты.

Для акватории сухумской бухты характерно повышение уровня моря в зимний период и понижение в осенний. Основной вклад на ход среднемесячных и сезонных изменений уровня моря вносит поверхностный сток. Так, максимальное количество стока в июне совпадает с максимальным значением уровнем моря.

На колебания уровня оказывают влияние и сгонно-нагонные процессы. Ветры северо-восточного горизонта, вызывающие нагонные процессы, способствуют повышению уровня моря в зимний период. Ветры северо-западного горизонта с наименьшей повторяемостью в летний период, вызывают сгонные процессы, следовательно, приводят к уменьшению уровня моря в летний сезон.

Между среднегодовыми значениями температуры и уровнем моря обнаружена корреляционная связь, равная  $r=0,55$ .

### **Список литературы**

1. Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Под ред. В.Н. Еремеева / Ю.Н. Горячкин, В.А. Иванов; НАН Украины, Морской гидрофизический институт. – Севастополь, 2006. – 210 с.
2. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О.Ю. Лаврова, А.Г. Костяной, С.А. Лебедев и др. - М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с.
3. Гицба Я.В. Тенденция изменения колебания уровня моря в акватории сухумской бухты. Вестник Луганского национального университета им. В. Даля. Международная научно-практическая конференция «Открытые физические чтения – 2020». – Луганск, 2020. – С. 115-121.
4. Экба Я.А., Дбар Р.С. Экологическая климатология природные ландшафты Абхазии. – Сухум, 2007. – 324 с.
5. Шулейкин В.В. Физика моря. – М.: Наука, 1968. – 1083 с.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОСОВ НА ВЫСОКОГОРНЫХ ЛУГАХ КАВКАЗА

<sup>1</sup>Е.А. Грабенко, <sup>2,3</sup>М.М. Иванов, <sup>3</sup>Н.В. Кузьменкова,

<sup>1</sup>А.А. Грачев, <sup>1,2</sup>В.Н. Голосов

*grabenko@inbox.ru*

*<sup>1</sup>Институт Географии РАН, Россия, г. Москва*

*<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
географический факультет, Россия, г. Москва*

*<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
химический факультет, Россия, г. Москва*

Техногенные радионуклиды, выпадающие из атмосферы, активно используются в качестве трассеров при изучении процессов перераспределения наносов [1]. Основным интерес представляют те радионуклиды, которые прочно сорбируются минеральными почвенными частицами. К таковым относится техногенный  $^{137}\text{Cs}$  и различные изотопы Pu [2]. Корректное применение методик, использующих данные радиоизотопы для оценки темпов эрозии и аккумуляции, предполагает наличие подтверждённой информации об источниках их поступления в окружающую среду, пространственной вариабельности начального выпадения и особенностях поведения в природной среде. В пределах большей части Европы, а также отдельных регионов Японии и ряда других регионов, где помимо глобальных выпадений  $^{137}\text{Cs}$  происходили его выпадения, обусловленные техногенными авариями, наличие в отложениях  $^{137}\text{Cs}$ , относящегося к разновременным источникам предполагает возможность интерпретации вертикального распределения радионуклидов для оценки интенсивности осадконакопления за несколько интервалов времени [1]. Плутоний, и в особенности его изотопы  $^{239,240}\text{Pu}$ , в последние годы также рассматривается в качестве одного из наиболее перспективных, долгоживущих радиоактивных трассеров [3]. Для многих регионов мира определение максимума концентрации  $^{241}\text{Am}$  (дочернего радионуклида  $^{241}\text{Pu}$ ) представляет собой альтернативу радиоцезиевому датированию, позволяющую определять глубину залегания поверхности, соответствующей периоду глобальных выпадений из атмосферы техногенных радионуклидов в период проведения ядерных взрывов в открытой атмосфере [4, 5].

Барьерная роль гор, таких как Кавказ, на пути миграции воздушных масс приводит к формированию большого количества атмосферных осадков на наветренных склонах, и интенсивному и неравномерному накоплению радионуклидов, переносимых атмосферным путём, в почве [6]. Здесь предполагается наличие двух известных источников поступления радионуклидов: глобальные выпадения в период испытаний ядерного оружия в открытой атмосфере с максимумом выпадения в 1963 г. [7], и Чернобыльские выпадения с апреле-мае 1986 г. [8]. Загрязнение техногенными радионуклидами Кавказа и, в частности, его северного макросклона остаётся

недостаточно изученным, что находит отражение в сравнительно малом количестве публикаций для столь крупного региона, хотя в последние годы отмечается определённый рост их числа [9].

Объектом исследования была выбрана привершинная поверхность горы Хуко на северном макросклоне Главного Кавказского хребта, где согласно имеющимся радиоэкологическим картам была зафиксирована плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  10-40 кБк/м<sup>2</sup>. Данная территория является частью водораздела на юго-восточной границе Северо-Западного Кавказа между реками Пшехашха (приток р. Пшехи) и Шахе в 7 км на юго-запад от г. Фишт. В силу высотно-зональных условий, вершина горы лишена древесного покрова и большую ее часть занимают горные луга. Вершинная поверхность имеет неоднородное строение рельефа, и может быть разделена на три части: северо-западную, центральную и юго-восточную. Северо-западная и центральная части некоторое время назад, по всей видимости, представляли собой единую в гидрологическом отношении систему, включающую ныне существующее озеро Хуко. Озеро, в настоящий момент, в силу продолжающегося тектонического поднятия Кавказа оказалось отделённым от каскада более мелких ныне заболоченных и оторфованных озёр, располагающихся на северо-западе привершинной поверхности. Само озеро Хуко имеет площадь 27 500 м<sup>2</sup> при максимальной глубине около 10 м и, при сравнительно малом по площади водосборе ( $\approx 120\,000$  м<sup>2</sup>) сохраняет положительный водный баланс за счёт интенсивных атмосферных осадков ( $\approx 1500$  мм/год) и мощного снежного покрова, который может сохраняться вплоть до июля [10]. Рельеф юго-восточной сектора представлен относительно пологой вершинной частью горы Хуко и относительно крутым, расчленённым ложбинами склоном северной экспозиции, сток с которого далее поступает в русло ручья, стекающего со склона горы, не впадающего в оз. Хуко. В устьевой части ложбин наблюдаются следы аккумуляции материала в виде пролювиальных конусов с плотным растительным покровом.

Проведённое в 2019 году исследование донных осадков оз. Хуко выявило высокое содержание в них техногенных радионуклидов [11]. При существующих темпах осадконакопления, техногенные радионуклиды оказались сконцентрированы в приповерхностной части толщи осадков мощностью 0,5 см. Предполагалось, что высокая концентрация  $^{137}\text{Cs}$  обусловлена выпадениями после Чернобыльской аварии. В то же время по всей видимости сравнительно высокие показатели концентрации  $^{241}\text{Am}$  обусловлены ядерными испытаниями. Была выявлена высокая концентрация  $^{239,240}\text{Pu}$ , которая потенциально могла указывать на некий экзотичный источник радионуклидов. Однако анализ изотопного соотношения  $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$  указал на глобальные выпадения, как на наиболее вероятный источник [11].

В результате исследования донных осадков озера, удалось установить и зафиксировать новые многокомпонентные записи экологических и климатических изменений в голоцене на Западном Кавказе. Палеоэкологические анализы донных отложений, магнитная восприимчивость, потери при прокаливании и исследования пыльцы

позволило определить пять основных климатических фаз с несколькими субфазами за период 10,5 тыс. лет. Возрастная модель основана на данных масс-спектрометрии  $^{14}\text{C}$  на масс-ускорителе, дополненных данными  $^{210}\text{Pb}$  для самой верхней части осадка. Выявленные теплые периоды (10,5–6,7; 6,7–5,5; 3,5–2,4; 0,8–0,5 тыс. лет назад) характеризовались высокой биологической продуктивностью в озере, о чем свидетельствует высокое содержание органического вещества и разрастание лесов, характерное для современных низкогорных и среднегорных зон. На это указывает увеличение численности *Quercus* sp., *Ulmus* sp., *Corylus* sp. и *Tilia* sp. в пыльцевых комплексах. Холодные периоды (5,5–3,5, 2,4–0,8 и 0,5 тыс. лет назад по настоящее время) отмечены последовательным снижением содержания органического вещества в озерных отложениях и, возможно, более высокой интенсивностью эрозии водосбора. Изменения в пыльцевых сообществах (например, пики *Abies* sp., *Picea* sp. и *Pinus* sp.) предположили возможное снижение высоты границ растительных поясов и расширение высокогорных лесных массивов. Резкие изменения в экосистеме озера были выявлены между 4,2 и 3,5 тыс. лет назад. Вероятно, это было вызвано климатическими колебаниями на Западном Кавказе в результате сложных сдвигов в системе океан-атмосфера во время события 4,2 тыс. лет назад. В целом, первый мультипрокси-сервер периода Голоцен в озерных отложениях позволяет по-новому взглянуть на историю климата Западного Кавказа. Человеческого воздействия не обнаружено. В соответствии с данными исследования, термальный максимум голоцена был отмечен на Западном Кавказе между 8,0 и 6,7 тыс. лет назад. Дальнейшее изучение перспективного климатического архива образцов из окрестностей оз. Хуко, а именно подробный анализ пыльцы, диатомовых водорослей и древесного угля, внесет ценный вклад в понимание природных процессов в регионе, включая реакцию экосистемы на текущие климатические изменения [12].

Цель данного исследования состояло в изучении содержания техногенных радионуклидов в почвах и отложениях в районе горы Хуко и возможности их использования в качестве трассеров при оценке интенсивности процессов эрозии и аккумуляции. Для этого были поставлены и решены ряд задач:

1. Определение начального уровня радиоактивного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  почв привершинной поверхности горы Хуко путём площадного отбора и на опорных площадках проб грунта с дальнейшим их анализом, а также сравнением полученных показателей с проводимыми ранее исследованиями и имеющимися радиоэкологическими картами.

2. Выявление участков потенциального сноса и зон аккумуляции наносов на основе оценок суммарных запасов и вертикального распределения техногенных радионуклидов в почвах.

3. Оценка возможности использования вертикального распределения запасов изотопов  $\text{Pu}$  для определения темпов их аккумуляции в конусах выноса и локальных понижениях в рельефе.

Для оценки вариабельности начального выпадения изотопа  $^{137}\text{Cs}$  отбор образцов почвы производился на плоских участках вершинных поверхностей на 5 опорных площадках (рис.1). На каждом участке пробы отбирались методом «конверта» со стороной 2,5-3 м. Каждый образец имел размеры 10x10x10 см и был вырезан из стенки почвенного разреза. При этом нами допускалось, что глубины в 10 см достаточно, чтобы в ненарушенных условиях оценить суммарные запасы выпадавших из атмосферы радионуклидов. Разрезы имели, как правило, небольшую мощность до 30-40 см, поскольку, начиная с глубины 8-10 см достаточно быстро нарастала доля грубообломочного материала и вскрывалась материнская порода.

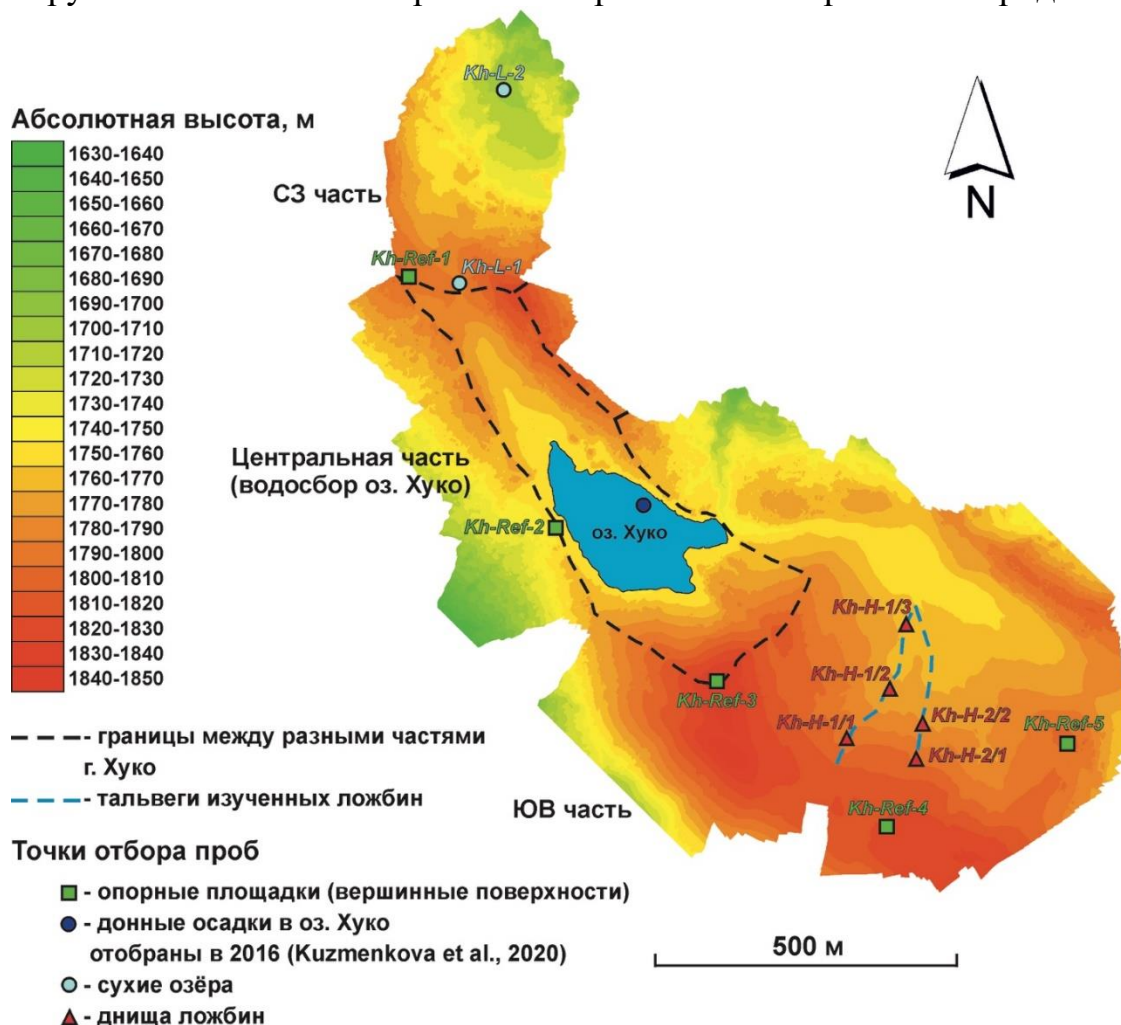


Рис. 1. Карта фактического материала в пределах вершинной поверхности г. Хуко

Послойный отбор проб производился на участках потенциальной аккумуляции наносов по длине днищ ложбин, расположенных в юго-восточной части исследуемого участка, а также в их конусе выноса с помощью металлического пробоотборника с внутренним диаметром 3 см. Нарезка проб на слои толщиной 1 см производилась непосредственно внутри пробоотборника. После этого, каждая из проб, упаковывалась в отдельные пластиковые пакеты, а пробоотборник очищался от грунта с помощью влажных салфеток.



Для проведения полевой гамма-спектрометрической съёмки использовался детектор с кристаллом NaI(Tl) 63\*63 мм, упакованный в алюминиевый корпус диаметром 80 мм и разрешением не менее 6,3%. К детектору был подключен GPS приемник, использовалось программное обеспечение AtomSpectraGPS. Время экспозиции составляло от 10 до 15 минут в зависимости от скорости счёта.

Все отобранные образцы были просушены при  $t +105^{\circ}\text{C}$ , перетёрты и упакованы в контейнеры с фиксированной геометрией для последующего гамма-спектрометрического анализа. Определение содержания гамма-активных радионуклидов осуществлялось при помощи гамма-спектрометра ORTEC GEM-C5060P4-B с применением полупроводникового детектора из сверхчистого германия (HPGe) с бериллиевым окном, и относительной эффективностью 20%. Эффективность регистрации  $^{137}\text{Cs}$  (661,5 keV) – 2,5%,  $^{241}\text{Am}$  (59,3 keV) – 18 %. Время экспозиции проб от 60 000 до 250 000 секунд в зависимости от наблюдаемой интенсивности регистрации искоемых радионуклидов. Массы образцов составляли от 1 до 3 грамм для послойных образцов и 30-100 грамм для опорных площадок. Минимально детектируемая активность для радионуклидов составляла 0,5 Бк/кг,

Перед выделением плутония образцы донных осадков были озолены ( $450^{\circ}\text{C}$ , 8 часов). Анализ содержания альфа-излучающих радионуклидов ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$ ) проводили на альфа-спектрометре ORTEC Alfa-Esemble-2 с кремниевым детектором ENS-U900 (UL-TRA-AS).

Наличие существенных запасов  $^{137}\text{Cs}$  в почве на привершинной поверхности горы Хуко было также подтверждено результатами проведённой полевой гамма-спектрометрической съёмки (рис. 2). Пик интенсивности регистрации гамма-квантов в районе 661,2 кэВ был чётко виден на каждом из спектров, полученных в поле.

Результаты оценки перераспределения наносов, полученные для альпийского луга привершинной части горы Хуко свидетельствуют о существенных различиях в темпах эрозионных процессов на трёх участках (северо-западном, центральном и юго-восточном). Это обусловлено различиями в проективном покрытии поверхности и особенностями рельефа каждого из участков. В случае водосбора оз. Хуко было определено на основании изучения донных отложений, что в течение всего голоцена растительный покров изменялся достаточно слабо несмотря на этапы потепления и похолодания [12]. Однако на последние столетия пришёлся относительно более холодный период. В этой связи, можно предположить, что до потепления последних 4 десятилетий [13] снежный покров на исследуемом участке сохранялся вплоть до августа, и поэтому не было достаточного времени для развития полноценного растительного покрова. Наиболее активные эрозионные процессы нами были зафиксированы на прорезанном ложбинами склоне северной экспозиции юго-восточного сектора. Фактически данные полевой гамма-спектрометрической съёмки подтверждают это предположение (рис.2). На двух других участках отсутствует какой-либо тренд изменений содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве с абсолютной высотой, что

свидетельствует об отсутствии влияния поверхностного стока на сокращение (эрозия) и прирост (аккумуляция) профиля почв.

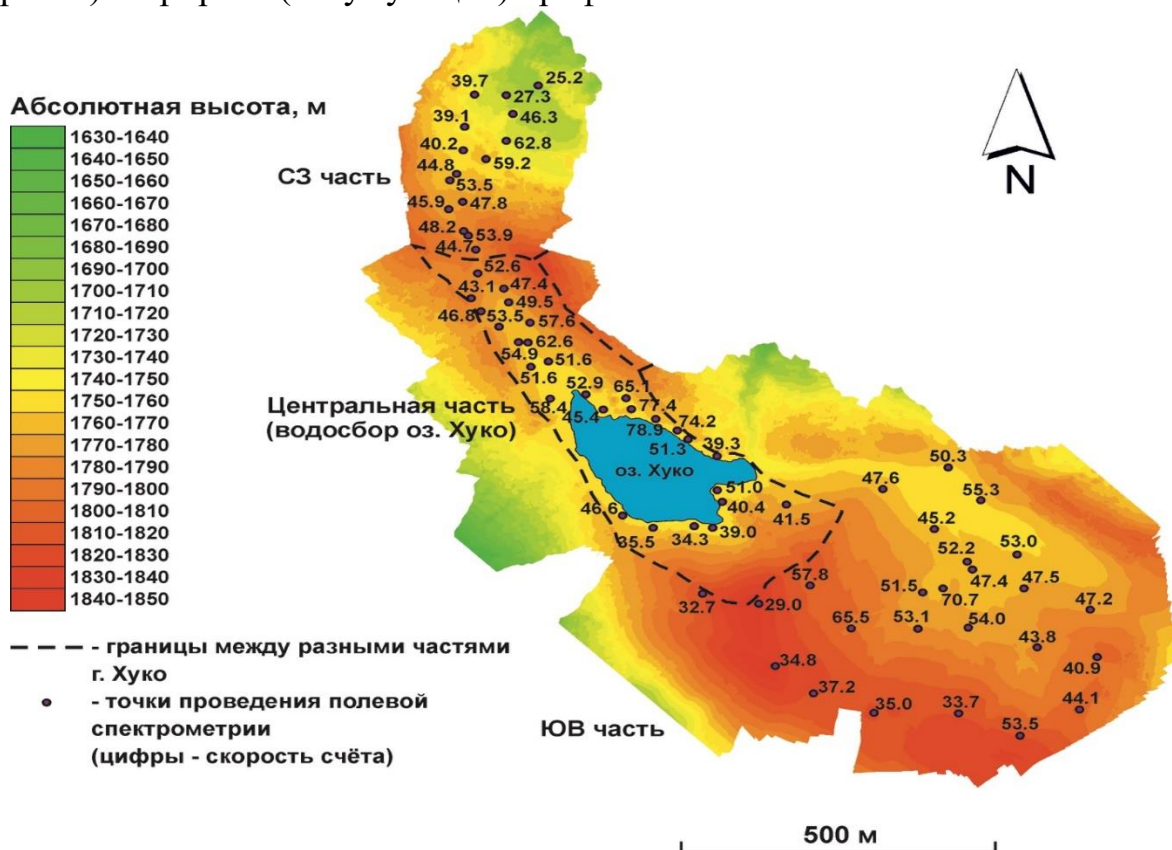


Рис. 2. Интенсивность регистрации (CPS) гамма-квантов  $^{137}\text{Cs}$ , полученная в результате проведения полевой гамма-спектрометрической съёмки на привершинной поверхности г. Хуко

Радиоактивное загрязнение почв горы Хуко обусловлено, как глобальными выпадениями после бомбовых испытаний, так и Чернобыльскими выпадениями. На Чернобыльское происхождение большей части запасов  $^{137}\text{Cs}$  указывает ряд фактов: а) высокие абсолютные значения его суммарных запасов; б) Данные аэроспектрометрической съёмки, которая проводилась в первые годы после аварии на Чернобыльской АЭС. Это позволило выделить данную часть Западного Кавказа, как зону с повышенными относительно фоновых запасами цезия-137 [8].

Средние по пяти точкам отбора суммарные запасы  $^{137}\text{Cs}$  в почвах на 5 опорных площадках составляют 12-14 кБк/м<sup>2</sup>, варьируя в пределах отдельных площадок от 6 до 23 кБк/м<sup>2</sup>, что обусловлено, прежде всего, высокой вариабельностью механического состава почв.

Эпюры вертикального распределения  $^{137}\text{Cs}$  в почвах днище ложбины и её конусе выноса (табл. 1) позволяют сделать вывод о значительном влиянии эрозионно-аккумулятивных и, возможно, ряда других экзогенных процессов на их формирование, так как они отличаются от стандартного профиля ненарушенной эрозионной эрозионными процессами почвы с максимумом в приповерхностном слое и экспоненциальным снижением запасов по глубине [1]. Отсутствие чётко выраженного пика в профиле почвы на конусе

выноса (точка отбора Kh-H-3) является надёжным индикатором развития процессов намыва почвы. Об этом же свидетельствуют достаточно высокие суммарные запасы цезия-137 и его высокие содержания вплоть до глубины 10 см указывают на переотложение смываемого с площади водосбора ложбины эродированного материала. В тоже время несмотря на то, что факт аккумуляции наносов можно считать доказанным в данном случае, определить среднегодовые темпы переотложения материала не представляется возможным. Возможны два равновероятных варианта. Чернобыльский пик цезия-137 может располагаться на глубине более 10 см, но также вероятно, что он был размыв. Хорошая выраженность конуса выноса в рельефе указывает на то, что переотложение наносов здесь происходит достаточно продолжительное время.

Таблица 1

Распределение запасов  $^{137}\text{Cs}$  по глубине в колонках из ложбины Kh-H-1 и Kh-H-2

Kh-H-1 (днище ложбины)		Kh-H-3 (конус выноса)	
Глубина, см	Запас $^{137}\text{Cs}$ , кБк/м <sup>2</sup>	Глубина, см	Запас $^{137}\text{Cs}$ , кБк/м <sup>2</sup>
0–1	<b>7.08±0.14</b>	0–1	0.92±0.07
1–2	1.07±0.08	1–2	1.04±0.08
2–3	3.23±0.07	2–3	2.02±0.08
3–4	3.50±0.14	3–4	<b>2.75±0.11</b>
4–5	<b>4.25±0.13</b>	4–5	1.99±0.06
5–6	2.03±0.10	5–6	2.05±0.08
6–7	1.09±0.07	6–7	1.52±0.08
7–8	0.47±0.06	7–8	1.70±0.09
8–9	0.37±0.04	8–9	2.12±0.09
9–10	0.30±0.04	9–10	2.15±0.11
Итого	23.4±0.87	Итого	18.26±0.85

Профиль вертикального распределения цезия-137 в днище ложбины имеет два чётко выраженных пика, расположенных на поверхности и на глубине 4-5 см. При этом соотношение цезия-137 и  $^{239,240}\text{Pu}$  указывает на то, что толща до глубины 4-5 см точно относится к периоду пост-Чернобыльских выпадений (табл. 2). Это позволяет предположить, что большая часть глобального  $^{137}\text{Cs}$  ранее эродирована, так как содержание  $^{137}\text{Cs}$  в горизонте 7-10 см невелико. Неравномерное содержание  $^{137}\text{Cs}$  в приповерхностных слоях почвы 1-4 см с максимумом на поверхности указывает на то, что происхождение верхнего пика (7 кБк/м<sup>2</sup>), расположенного на поверхности может быть различным. Это может быть обусловлено селективным смывом с водосбора ложбины, когда эродируются наиболее тонкие фракции почвы, которые впоследствии переотложились в задернованном днище. Но нельзя исключать возможности смещения поверхностного слоя почвы с борта ложбины за счёт солифлюкции. Тем не менее, в любом случае вертикальное распределение  $^{137}\text{Cs}$  в данной части днища ложбины указывает на проявление эрозионно-аккумулятивных процессов.

Таблица 2

Распределение запасов  $^{239,240}\text{Pu}$ , соотношения  $^{239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$  по глубине в точках Kh-L-2 и Kh-H-1/1 и предполагаемые источники запасов  $^{137}\text{Cs}$

Глубина, см	$^{239,240}\text{Pu}$ , Бк/м <sup>2</sup>	$^{239,240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ (1988)	Источник $^{137}\text{Cs}$ *
<b>Kh H-1/1</b>			
0–1	21.3±0.90	0.001±0.0001	Чернобыль
1–2	15.2±1,00	0.007±0.001	Чернобыль
2–3	26.6±1.20	0.004±0.0003	Чернобыль
3–4	48.4±2.10	0.007±0.001	Чернобыль
4–5	19.7±0.90	0.002±0.0002	Чернобыль
5–6	sample is lost		
6–7	29.3±1.3	0.013±0.001	Чернобыль, Глобальные накопления
Всего***	131±5.80	0.003±0.0002	Чернобыль
<b>Kh-L-2</b>			
0–1	18.5±0.90	0.011±0.001	Чернобыль**
1–2	2.40±0.10	0.001±0.0001	Чернобыль
2–3	20.5±1,00	0.005±0.0004	Чернобыль
3–4	160±8,00	0.031±0.003	Глобальные накопления
4–5	56.1±3,00	0.032±0.003	Глобальные накопления
5–6	50.7±2.50	0.087±0.009	Глобальные накопления
Total	311±15.5	0.02±0.002	Чернобыль, Глобальные накопления
<b>Lake Khuko (Kuzmenkova et al., 2020)</b>			
0–0.5	–	0,027±0,003	Чернобыль, Глобальные накопления

\*пороговые значения определения источника  $^{137}\text{Cs}$  были взяты значения из сводных таблиц Kuzmenkova et al., (2020) и Meusburger et al., (2020): Chernobyl <0.008; Chernobyl, Global 0.008–0.029; Global > 0.029.

\*\*исходя из положения точки такое изотопное соотношение может быть типичным для Чернобыльских выпадений

\*\*\* только верхние 5 см

Таким образом, вышеизложенное позволяет утверждать, что наиболее активно эрозионные процессы на исследуемой территории протекают на юго-западном участке. Их интенсивность контролируется рядом факторов, среди которых ключевое значение имеет проективное покрытие поверхности почвы травянистой растительностью. Анализ космоснимков позволяет утверждать, что именно на юго-западном участке проективное покрытие достаточно сильно меняется с момента схода снега и до наступления холодов, а также год от года. Другими факторами, которые определяют темпы эрозии и переотложения наносов являются характер схода снега и выпадение стокоформирующих дождей в тёплое время года. Все перечисленные факторы зависят от метеорологических условий конкретного года, начиная с момента снеготаяния и заканчивая наступлением холодов. Как показывают результаты экспериментов по дождеванию, проведённые на альпийских лугах в Альпах, увеличение проективного покрытия травянистой растительностью с 30 до 60%

ведёт к относительно небольшому сокращению плоскостного смыва почвы [14]. Следовательно, существенных различий в темпах смыва при проективном покрытии почвы с площади водосборов ложбин в период до и после 1986 года не происходило. Однако при концентрации стока в днищах ложбин энергия потоков возрастает, и поэтому здесь различия в темпах размыва при изменениях проективного покрытия почвы гораздо выше.

Высокая вариабельность запасов в аккумулируемых наносах  $^{239,240}\text{Pu}$  (табл. 2), содержащегося в наносах, аккумулированных за последние десятилетия и недостаточная глубина отбора проб не позволяет в нашем случае использовать его для оценки темпов эрозии и аккумуляции наносов на основе разработанных моделей [15]. Однако, полученные результаты указывают на возможность применения  $^{239,240}\text{Pu}$  для оценки перераспределения наносов в альпийском поясе Западного Кавказа.

При отсутствии нарушений, обусловленных развитием процессов эрозии или механическими воздействиями на почвенный профиль, пик запасов  $^{239,240}\text{Pu}$  может быть использован в качестве дополнительного хронологического маркера при послойном анализе проб, хотя такой вид анализа является значительно более трудоёмким в сравнении с гамма-спектрометрией. Однако, данный маркер может быть даже более надежным чем  $^{137}\text{Cs}$ , в силу возможности определения его происхождения по изотопным соотношениям и относительно малой мобильности Pu в почве.

*Работа выполнена в рамках гранта РФФ 17-05-01170.*

#### Список литературы

1. Golosov, V. N., Walling, D. E., Konoplev, A. V., Ivanov, M. M., & Sharifullin, A. G. (2018). Application of bomb-and Chernobyl-derived radiocaesium for reconstructing changes in erosion rates and sediment fluxes from croplands in areas of European Russia with different levels of Chernobyl fallout. *Journal of environmental radioactivity*, 186, 78.
2. Sholkovitz, E. R. (1983). The geochemistry of plutonium in fresh and marine water environments. *Earth-Science Reviews*, 19(2), 95-161.
3. Arata, L., Alewell, C., Frenkel, E., A'Campo-Neuen, A., Iurian, A.-R., Ketterer, M.E., et al., 2016a. Modelling deposition and erosion rates with RadioNuclides (MODERN) – part 2: a comparison of different models to convert 239+240Pu inventories into soil re- distribution rates at unploughed sites. *J. Environ. Radioact.* 162–163, 97–106.
4. Appleby, P. G., Richardson, N., & Nolan, P. J. (1991).  $^{241}\text{Am}$  dating of lake sediments. *Hydrobiologia*, 214(1), 35-42.
5. Corcho-Alvarado, J. A., Diaz-Asencio, M., Froidevaux, P., Bochud, F., Alonso-Hernández, C. M., & Sanchez-Cabeza, J. A. (2014). Dating young Holocene coastal sediments in tropical regions: Use of fallout  $^{239,240}\text{Pu}$  as alternative chronostratigraphic marker. *Quaternary Geochronology*, 22, 1-10.
6. Kvasnikova E. V., Stukin E. D., Golosov V. N. (1999) Heterogeneity of  $^{137}\text{Cs}$  Contamination in an Area at a Large Distance from the Chernobyl NPP / *Meteorologîa i gidrologîa*, (2), 5–11
7. Hirose, K., Aoyama, M., Katsuragi, Y., & Sugimura, Y. (1987). Annual deposition of Sr-90, Cs-137 and Pu-239,240 from the 1961-1980 nuclear explosions: A simple model. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 65(2), 259-277.
8. Izrael, Yu A, Cort M De, Jones A R, Nazarov I M, Fridman Sh D, Kvasnikova E V, Stukin E D, Kelly G N, Matveenko I I, Pokumeiko Yu M, Tabatchnyi L Ya, Tsaturov (1996) Yu. The atlas of cesium-137 contamination of Europe after the Chernobyl accident. Belarus: N. p.

9. Kordzadze, A. A., Surmava, A. A., & Kukhalashvili, V. G. (2013). Numerical investigation of the air possible pollution in case of large hypothetical accidents in some industrial territories of the Caucasus. *Journal of the Georgian Geophysical Society*, 16, 13-23.
10. Efimov, V. V., & Anisimov, A. E. (2011). Climatic parameters of wind-field variability in the Black Sea region: Numerical reanalysis of regional atmospheric circulation. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 47(3), 350-361
11. Kuzmenkova, N. V., Ivanov, M. M., Alexandrin, M. Y., Grachev, A. M., Rozhkova, A. K., Zhizhin, K. D., Grabenko E.A. & Golosov, V. N. (2020). Use of natural and artificial radionuclides to determine the sedimentation rates in two North Caucasus lakes. *Environmental Pollution*, 114269.
12. Grachev Alexei M., Novenko Elena Y., Grabenko Evgeniy A., Alexandrin Mikhail Y., Zazovskaya Elya P., Konstantinov Evgeniy A., Shishkov Vasiliy A., Lazukova Lyudmila I., Chepurnaya Anna A., Kuderina Tatiana M., Ivanov Maxim M., Kuzmenkova Natalia V., Darin Andrei V., Solomina Olga N. 2021 The Holocene paleoenvironmental history of Western Caucasus (Russia) reconstructed by multi-proxy analysis of the continuous sediment sequence from lake Khuko // *Holocene*.
13. Toropov PA, Aleshina MA, Grachev AM. 2019. Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century. *International Journal of Climatology* 39 (12): 4703–4720
14. Martin C., Pohl M., Alewell C., Korner C. and Rixen C. (2010) Interrill erosion at disturbed alpine sites: Effects of plant functional diversity and vegetation cover. *Basic Applied Ecology*, 11, pp.619-626.
15. Meusburger, K., Evrard, O., Alewell, C., Borrelli, P., Cinelli, G., Ketterer, M., Mabit L., Panagos P., van Oost K. & Ballabio, C. (2020). Plutonium aided reconstruction of caesium atmospheric fallout in European topsoils. *Scientific reports*, 10(1), 1-16.

## О ФАКТОРАХ И ПРОБЛЕМАХ АКТИВИЗАЦИИ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СОЧИНСКОМ РЕГИОНЕ

**Н.К. Гудкова**

*n.k.gud@yandex.ru*

*Филиал института природно-технических систем в г. Сочи,  
Россия, г. Сочи*

Отличительная особенность Сочинского региона состоит в активном протекании опасных геологических процессов (ОГП).

Такое состояние природной среды можно характеризовать как неустойчивое равновесное состояние, которое при техногенном вторжении в нее без учета таких особенностей региона обязательно приведет к негативным последствиям, что и подтверждает ситуация, характеризующаяся активизацией опасных геодинамических процессов: оползней, селевых потоков, эрозии и др. в Сочинском регионе за последнее десятилетие [1].

Активизация современных опасных геологических процессов обусловлена тремя группами факторов:

1. Природные, связанные с особенностями геологического строения, рельефом и климатом региона.

2. Техногенные, связанные с крупномасштабным строительством.

3. Антропогенные, связанные с несовершенством сложившейся системы менеджмента. К этой группе также следует отнести: малоэффективную систему мониторинга геологической среды и отсутствие единой комплексной системы получения, хранения и обработки информации, получаемой в процессе мониторинговых исследований [2].

Возрастающее в регионе техногенное воздействие на природную среду провоцирует активность уже существующих оползней, селей, обвалов и т.д. и возникновение новых ОГП. Хозяйственное освоение таких территорий связано с рисками, а принятие решений по освоению должно основываться на мониторинге и долгосрочном прогнозе геодинамических процессов.

Для выработки рекомендаций по предотвращению или снижению негативных последствий от воздействия ОГП, необходимы дополнительные комплексные инженерно-геологические исследования и мониторинг. Такую работу в свое время выполнял Северокавказский геоэкологический центр (СК ГЭЦ), организованный на базе Черноморской оползневой станции, созданной еще в 1936 г. Были составлены паспорта около двух тысяч оползней, осуществлялся мониторинг опасных процессов. Однако в начале прошедшего десятилетия СК ГЭЦ был ликвидирован, и эта работа в настоящее время не ведется, а материалы не актуализируются.

В период реализации олимпийского проекта были выявлены высокие риски активизации опасных геологических процессов [3] и проделана огромная проектно-изыскательская работа, включавшая комплекс инженерно-геологических и инженерно-экологических исследований. В 2010 г. по заказу

ГК «Олимпстрой» ЗАО «Институт телекоммуникаций» разработал программный продукт - систему «ГИС-3D», который включал в себя геоэкологический модуль. Целью являлось создание системы геоинформационной поддержки олимпийского проекта на основе 3D – моделирования и выявления зон рисков активизации опасных природных процессов. Для горного кластера олимпийских объектов были предприняты попытки математического моделирования опасных процессов (лавины, сели).

После завершения олимпийского проекта систему «ГИС-3D» предполагалось передать г. Сочи, как наследие Олимпиады 2014 г, однако этого не произошло. Для эффективной работы геоэкологического модуля системы «ГИС-3D» был необходим комплексный мониторинг территории, основным элементом которого должен был стать информационно-аналитический центр. Однако такой центр так и не был создан.

На данном этапе для минимизации рисков активизации ОГП нужно создать в г. Сочи единый информационно-аналитический центр, база данных которого должна формироваться по результатам мониторинга окружающей среды и геотехнического мониторинга различными организациями региона. Это позволит разработать научно-обоснованную систему управления рисками для обеспечения экологической безопасности всего региона.

Необходимо возродить систему мониторинга и прогноза ОГП с целью использования этих данных при выборе места, проектировании и строительстве объектов, и принятии обоснованных управленческих решений. А на этапе проектирования объектов задача состоит в переходе на новую, более высокую ступень – математическое моделирование системы «сооружение-геосреда». Экономия средств на этом – ущербна для экономики в целом и затратна для ведомств, на балансе которых находятся подверженные оползням и другим ОГП объекты.

### **Список литературы**

1. Государственный мониторинг состояния недр территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов в 2014 г. [электронный ресурс] Режим доступа: URL:[http://geomonitoring.ru/Sochi/aboutotchet\\_29.html](http://geomonitoring.ru/Sochi/aboutotchet_29.html) (дата обращения 12.10.18.).
2. Гудкова Н.К. Мониторинг геологической среды олимпийских объектов в Сочи // Системы контроля окружающей среды. 2016. №3(23). С.130 -133.
3. Гудкова Н.К. Олимпийский проект в Сочи: экологические аспекты // Academia. Архитектура и строительство. 2015. №2. С.91-94.



# ОБ ОЦЕНКЕ ВРЕМЕНИ НАЧАЛА ИЗЛУЧЕНИЯ И КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА СИГНАЛОВ НА ПЛОСКОСТИ

<sup>1</sup>С. Дашян, <sup>2,3</sup>Ю.А. Кутоянц, <sup>2</sup>К. Фаринетто, <sup>2,3,4</sup>О.В. Чернояров  
*chernoyarovov@tpei.ru*

<sup>1</sup>Университет Лилля, Франция, г. Лилль

<sup>2</sup>Университет Ле Мана, Франция, г. Ле Ман

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, г. Москва

<sup>4</sup>Майкопский государственный технологический университет,  
Россия, г. Майкоп

## Введение

Статистический анализ случайных (пуассоновских, гауссовских) процессов находит широкие применения в различных радиотехнических приложениях. Так, пуассоновскими процессами адекватно описываются процессы ядерного излучения (например, в задачах обнаружения радиоактивных веществ), поток фотоэлектронов, создаваемых светом на светочувствительных поверхностях, вторичные толчки после основного землетрясения, электрические отклики нервов на стимуляцию, информационные сигналы в задачах лазерной локации при обнаружении и определении местоположения объектов, задачах зондирования и слежения и т.д. Гауссовские процессы могут выступать в качестве моделей излучаемых или отраженных радиолокационных сигналов, сигналов, искаженных модулирующими помехами, сигналов в системах связи с шумовой несущей и др.

Одной из актуальных и нерешенных до конца задач статистического анализа случайных процессов является задача пространственно-временной локализации (определения местоположения и момента начала излучения) источника, излучающего сигнал по области, контролируемой набором датчиков. Подобные ситуации возникают при мониторинге радиоактивного излучения, взрывов, сейсмической активности, в радиолокации и радионавигации, при обнаружении слабых оптических сигналов и т.д. [1].

Цель работы – описать известные и предложить новые подходы к решению задачи локализации источника пуассоновских или гауссовских сигналов при наличии сингулярностей различных типов, а также исследовать свойства выносимых оценок искомым временного и координатных параметров, на основе которых могут быть сделаны обоснованные выводы целесообразности применения того или иного алгоритма оценивания в практических приложениях.

## Постановка задачи

Предположим, что имеется  $K$  датчиков, расположенных на плоскости в точках  $D_k$ ,  $k = \overline{1, K}$  с координатами  $D_k = (x_k, y_k)$ , соответственно. В некоторый момент времени  $\tau_0$  из точки  $D_0$  с координатами  $D_0 = (x_0, y_0)$ ,

испускается сигнал, который регистрируется датчиком  $D_k$  на интервале  $[0, T]$  в виде неоднородного пуассоновского процесса  $X_k^T$  с функцией интенсивности.

$$\lambda_k(\vartheta_0, t) = S_k(t - \tau_k) + \lambda_0. \quad (1)$$

Здесь  $S_k(t) = 0$  при  $t < 0$  и  $S_k(t) > 0$  при  $t \geq 0$  – интенсивность сигнала, поступающего на датчик  $D_k$  от источника излучения в момент времени

$$\tau_k = \tau_0 + v^{-1} \|D_k - D_0\|_2, \quad (2)$$

$v > 0$  – скорость распространения сигнала,  $\|\cdot\|_2$  – евклидово расстояние в  $R^2$ ,  $\lambda_0 > 0$  – интенсивность фонового шума. Пример конфигурации системы датчиков при  $k = 5$  показан на рис. 1.

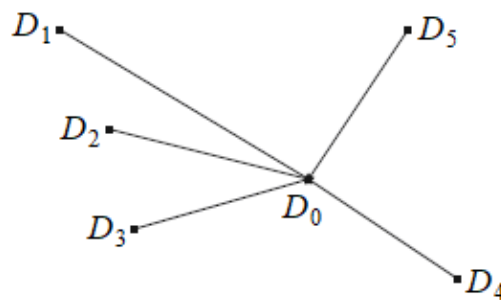


Рис. 1. Мониторинг источника излучения набором из 5 датчиков

Будем считать, что функции  $S_k(t)$  и величины  $D_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ ,  $v$ ,  $\lambda_0$  известны. По наблюдениям  $K$  реализаций случайных процессов  $X^T = (X_1^T, X_2^T, \dots, X_K^T)$  с интенсивностями (1) и имеющейся априорной информации необходимо оценить параметр  $\vartheta_0 = (x_0, y_0, \tau_0)$ .

Отметим, что возможна и обратная постановка задачи. Предположим, что имеется  $K$  источников излучения в точках  $D_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , координаты  $(x_k, y_k)$  которых известны, и приемник в точке  $D_0$  с неизвестными координатами  $(x_0, y_0)$ . В момент времени  $\tau_0$  источники начинают излучать слабые оптические сигналы, описываемые неоднородными пуассоновскими процессами с функциями интенсивности (1), которые поступают на приемник в моменты времени  $\tau_k$  (2). По наблюдаемым данным и имеющейся априорной информации необходимо определить момент начала излучения  $\tau_0$  и местоположение приемника  $(x_0, y_0)$ . Если неизвестный параметр, подлежащий оценке, имеет вид  $\vartheta_0 = (x_0, y_0)$  (момент начала излучения известен), то имеем задачу, близкую к задаче GPS-локализации [2].

В дальнейшем ограничимся практически важным случаем, когда ошибки при оценивании параметра  $\vartheta_0$  являются малыми (выполняется условие высокой апостериорной точности), а сама выносимая оценка является состоятельной [3]. С этой целью введем в рассмотрение большой параметр  $n$  и представим интенсивности (1) в виде

$$\lambda_{k,n}(\vartheta_0, t) = nS_k(t - \tau_k(\vartheta_0)) + \lambda_0, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (3)$$

Очевидно, при  $n \rightarrow \infty$  в (3) получаем асимптотику больших сигналов. Второй возможный вид асимптотики (асимптотика больших интервалов наблюдения) возникает, если  $T \rightarrow \infty$ .

### Обзор известных результатов по оценке координат источника сигналов

В работе [4] показано, что если функции  $S_k(t)$  достаточно гладкие, так что для модели (3) выполняются соответствующие условия регулярности, то оценка максимального правдоподобия (ОМП)  $\hat{\vartheta}_n$  и байесовская оценка (БО)  $\tilde{\vartheta}_n$  параметра  $\vartheta_0 = (x_0, y_0)$  являются состоятельными, асимптотически нормальными:

$$\sqrt{n}(\hat{\vartheta}_n - \vartheta_0) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} N(0, \mathbf{I}^{-1}(\vartheta_0)), \quad \sqrt{n}(\tilde{\vartheta}_n - \vartheta_0) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} N(0, \mathbf{I}^{-1}(\vartheta_0)) \quad (4)$$

и асимптотически эффективными, а также имеет место сходимость полиномиальных моментов. Здесь  $\mathbf{I}(\vartheta_0)$  – матрица информации Фишера, а  $\mathbf{I}^{-1}(\vartheta_0)$  – обратная ей матрица. Пример функции интенсивности (3) регулярного пуассоновского процесса показан на рис. 2а.

В работе [5] предполагалось, что функции  $S_k(t)$  допускают представление

$$S_k(t) = a|t|^\kappa + o(t), \quad \kappa \in (0, 1/2), \quad (5)$$

т.е. имеют в точке  $t=0$  особенность типа «касп». Здесь  $a$  – некоторая несущественная константа, а  $o(t)$  обозначает члены более высокого по сравнению с  $t$  порядка малости. Пример функции интенсивности (3) пуассоновского процесса с такой сингулярностью показан на рис. 2б. Было установлено [5], что при выполнении (5) асимптотически эффективной оценкой координатного параметра  $\vartheta_0$  является только БО  $\tilde{\vartheta}_n$ , причем

$$\frac{1}{n^{2\kappa+1}}(\tilde{\vartheta}_n - \vartheta_0) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \zeta_1 \quad (6)$$

по распределению, где  $\zeta_1$  – некоторый случайный вектор, определяемый с помощью дробного броуновского движения. Также для БО  $\tilde{\vartheta}_n$  выполняются условия состоятельности и сходимости полиномиальных моментов.

В работе [6] рассмотрен случай, когда функции  $S_k(t)$  имеют в точке  $t=0$  разрыв первого рода, так что

$$S_k(t) = a1_{\{t \geq 0\}} + o(t). \quad (7)$$

Здесь  $a$  – несущественная константа, а  $1_{\{t \geq 0\}} = 0$  при  $t < 0$  и  $1_{\{t \geq 0\}} = 1$  при  $t \geq 0$  – функция Хевисайда. Пример функции интенсивности (3) пуассоновского процесса с сингулярностью типа (7) (типа «скачок») изображен на рис. 2в.

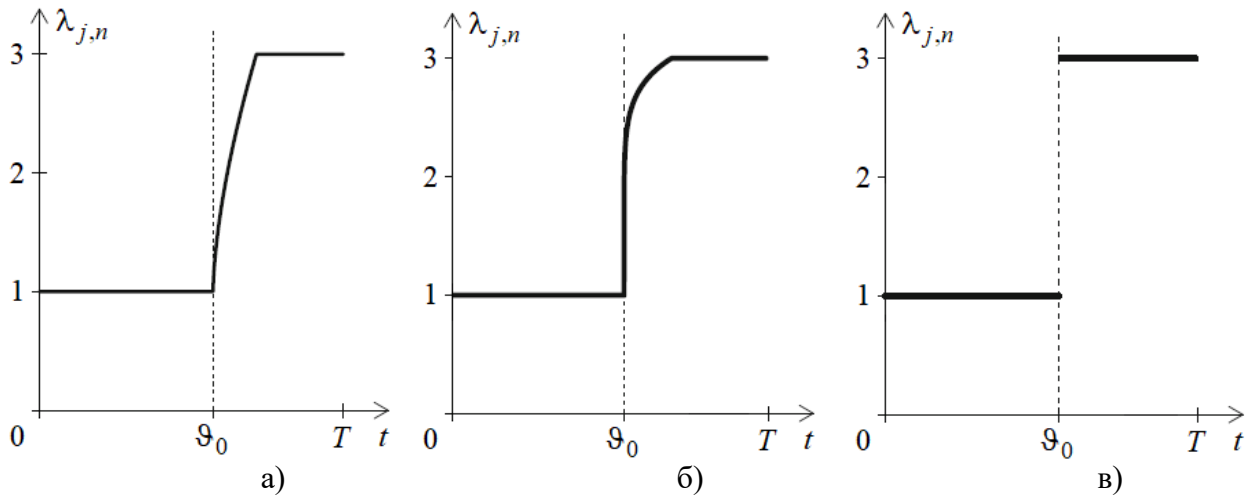


Рис. 2. Примеры функций интенсивности пуассоновских процессов: а) регулярный процесс; б) процесс с сингулярностью типа «касп»; в) процесс с сингулярностью типа «скачок»

Было доказано [6], что при выполнении (7), как и в случае сингулярности типа «касп» (5), только БО  $\tilde{\vartheta}_n$  координатного параметра  $\vartheta_0$  является асимптотически эффективной и сходится со скоростью  $n^{-1}$  по распределению к некоторому случайному вектору  $\zeta_2$ :

$$n(\tilde{\vartheta}_n - \vartheta_0) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \zeta_2. \quad (8)$$

При этом также удовлетворяются свойства состоятельности БО и сходимости ее полиномиальных моментов.

Все три сходимости (4), (6), (8) можно формально объединить как

$$\tilde{\vartheta}_n = \vartheta_0 + \varphi_n \zeta_n, \quad \varphi_n \rightarrow 0, \quad \zeta_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \zeta, \quad (9)$$

где скорость сходимости  $\varphi_n$  и предельный случайный вектор  $\zeta$  определяются типом сингулярности функций  $S_k(t)$  (3).

В работе [7] рассмотрена задача оценки параметра  $\vartheta_0 = (x_0, y_0)$ , если регистрируемый  $k$ -м датчиком случайный процесс  $X_k^T = (X_k(t), 0 \leq t \leq T)$  описывается стохастическим дифференциальным уравнением вида

$$dX_k(t) = S_k(t - \tau_k) Y_k(t) dt + \varepsilon \sigma_k(t) dW_k(t). \quad (10)$$

Здесь  $S_k(t) = 0$  при  $t < 0$  и  $S_k(t) > 0$  при  $t \geq 0$  – известные детерминированные функции,  $\tau_k$  – задержки, определяемые соотношением (2),  $Y_k(t)$  – гауссовские случайные процессы, которые удовлетворяют линейным уравнениям

$$dY_k(t) = f_k(t) Y_k(t) dt + \varepsilon b_k(t) dV_k(t), \quad Y_k(0) = y_0 \neq 0, \quad 0 \leq t \leq T \quad (11)$$

и описывают либо случайный характер излучаемых сигналов, либо модулирующие помехи в каналах распространения сигналов от источника излучения,  $W_k(t)$ ,  $V_k(t)$ ,  $k = \overline{1, K}$  – взаимно статистически независимые стандартные винеровские случайные процессы, а величина  $\varepsilon \in (0, 1]$  и функции  $\sigma_k(t)$ ,  $f_k(t)$ ,  $b_k(t)$  определяют интенсивность и корреляционные свойства фоновых и мультипликативных случайных искажений.

В регулярном случае и при наличии сингулярностей типа «касп» и «скачок» были установлены [7] асимптотические (при  $\varepsilon \rightarrow 0$ ) свойства ОМП  $\hat{\vartheta}_\varepsilon$  и БО  $\tilde{\vartheta}_\varepsilon$  параметра  $\vartheta_0$ , аналогичные (4), (6) и (8). В частности, найдены скорости сходимости и предельные распределения оценок, которые, следуя (9), символически могут быть записаны следующим образом

$$\tilde{\vartheta}_\varepsilon = \vartheta_0 + \varphi_\varepsilon \zeta_\varepsilon, \quad \varphi_\varepsilon \rightarrow 0, \quad \zeta_\varepsilon \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \zeta,$$

Как и в (9),  $\varphi_\varepsilon$  и случайный вектор  $\zeta$  определяются типом сингулярности функций  $S_k(t)$  (10). Так, в регулярном случае  $\varphi_\varepsilon \sim \sqrt{\varepsilon}$ , при наличии сингулярностей типа «касп»  $\varphi_\varepsilon \sim \varepsilon^{1/(2k+1)}$ , при наличии сингулярностей типа «скачок»  $\varphi_\varepsilon \sim \varepsilon$ .

### **Общие положения при оценивании времени начала излучения и координат источника сигнала**

Можно предложить два подхода к оценке времени начала излучения и координат источника сигналов. Первый подход, рассмотренный в работах [4-7], состоит в том, чтобы по наблюдаемым реализациям случайных процессов  $X^T = (X_1^T, X_2^T, \dots, X_K^T)$  сформировать функционал отношения правдоподобия и далее путем его максимизации [3] или интегрирования с соответствующими весовыми функциями (в предположении, что функция потерь является квадратичной) [3] найти ОМП или БО параметра  $\vartheta_0 = (x_0, y_0, \tau_0)$ .

При втором подходе используется тот факт, что вся информация, необходимая для состоятельного оценивания параметра  $\vartheta_0$  содержится в моментах поступления сигналов от источника излучения на датчики. Таким образом, на основе наблюдаемых данных сначала строятся оценки задержек  $\tau_k(\vartheta_0)$ ,  $k = \overline{1, K}$  (2), а затем на их основе – оценка времени начала излучения и координат источника сигнала. Данный способ был рассмотрен в работе [8]. Показано, что оценка вектора  $\vartheta_0$  может быть достаточно простым образом получена с помощью метода наименьших квадратов (МНК). С этой целью следует ввести в трехмерный параметр  $\vartheta_0$  (исходное уравнение для которого нелинейно и не имеет аналитического решения) в дополнении к компонентам  $\gamma_1 = x_0$ ,  $\gamma_2 = y_0$ ,  $\gamma_3 = \tau_0$  компоненту  $\gamma_4 = (x_0^2 + y_0^2 - v^2 \tau_0^2)/2$ , переходя от оценки вектора  $\vartheta_0$  к оценке вектора  $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ . В этом случае, как показано в [8], уравнение для  $\gamma$  становится линейным, и оценка параметра  $\gamma$  по методу МНК легко вычисляется. При этом можно установить состоятельность и другие свойства оценок искомых параметров.

### **Оценка времени начала излучения и координат источника сигнала: первый подход**

Для простоты иллюстрации первого подхода к оценке параметра  $\vartheta_0 = (x_0, y_0, \tau_0)$  используем гауссовскую модель наблюдений (10), (11).

Предположим, что функции  $S_k(t)$ ,  $\sigma_k(t)$ , положения датчиков  $D_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , скорость распространения сигналов  $v$  (2) и область  $\Theta$  возможных

значений параметра  $\vartheta_0$  априори известны. Множество  $\Theta$  является открытым, ограниченным и выпуклым подмножеством  $R^3$ . Отметим, что для заданной конфигурации датчиков  $D_k$ ,  $k = \overline{1, K}$  область  $\Theta_0$  возможных значений координат  $D_0 = (x_0, y_0)$  и интервал  $T_0$  возможных значений задержек  $\tau_0$  связаны. Обозначим

$$r_m = \min_{k=1, \dots, K} \inf_{D_0 \in \Theta_0} \|D_k - D_0\|_2, \quad r_M = \max_{k=1, \dots, K} \sup_{D_0 \in \Theta_0} \|D_k - D_0\|_2,$$

$$\tau_m = r_m / v, \quad \tau_M = r_M / v.$$

Тогда очевидно, что  $T_0 \subset (-\tau_m, T - \tau_M)$ .

Будем считать, что первые слагаемые в правой части (10) ограничены, а функции  $\sigma_k(t)$  отделены от нуля (строго положительны). Тогда функционал отношения правдоподобия как функцию текущего значения  $\vartheta$  неизвестного параметра  $\vartheta_0$  можно представить в виде [2, 7]

$$L(\vartheta, X^T) = \exp \left[ \sum_{k=1}^K \int_{\tau_k(\vartheta)}^T \frac{S_k(t - \tau_k(\vartheta))}{\varepsilon^2 \sigma_k^2(t)} dX_k(t) - \sum_{k=1}^K \int_{\tau_k(\vartheta)}^T \frac{S_k^2(t - \tau_k(\vartheta))}{2\varepsilon^2 \sigma_k^2(t)} dt \right].$$

Согласно [3] ОМП  $\hat{\vartheta}_\varepsilon$  времени начала излучения и координат источника сигнала определяется из решения уравнения правдоподобия

$$L(\hat{\vartheta}_\varepsilon, X^T) = \sup_{\vartheta \in \Theta} L(\vartheta, X^T).$$

Если параметр  $\vartheta_0$  можно рассматривать как случайный вектор с априорной плотностью вероятности  $p(\vartheta)$ , то его БО  $\tilde{\vartheta}_\varepsilon$  при квадратичной функции потерь представляет собой условное математическое ожидание по апостериорной плотности вероятности  $p(\vartheta|X^T) = p(\vartheta)L(\vartheta, X^T) / \int_{\Theta} p(\vartheta)L(\vartheta, X^T) d\vartheta$  [3]:

$$\tilde{\vartheta}_\varepsilon = \int_{\Theta} \vartheta p(\vartheta|X^T) d\vartheta.$$

В дальнейшем примем, что функция  $p(\vartheta)$  непрерывна и строго положительна в области  $\Theta$ .

Сформулируем следующие условия.

1) Для любого компакта  $K \in \Theta$  и любого  $\mu > 0$  удовлетворяется неравенство

$$g_K(\mu) = \inf_{\vartheta_0 \in K} \inf_{\|\vartheta - \vartheta_0\|_3 > \mu} G(\vartheta, \vartheta_0) > 0.$$

Здесь

$$G(\vartheta, \vartheta_0) = \sum_{k=1}^K \int_{\tau_k(\vartheta) \wedge \tau_k(\vartheta_0)}^T \frac{[S_k(t - \tau_k(\vartheta)) - S_k(t - \tau_k(\vartheta_0))]^2}{\sigma_k^2(t)} dt,$$

а  $\|\cdot\|_3$  – евклидова норма в  $R^3$ .

2) Функции  $S_k(t)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , по крайней мере, дважды непрерывно дифференцируемы, причем  $S_k(t) = 0$ , если  $t < 0$ , и  $S_k(t) > 0$ , если  $t \geq 0$ .

3) Информационная матрица Фишера  $\mathbf{I}(\vartheta)$  равномерно не вырождена, так что

$$\inf_{\vartheta \in \Theta} \inf_{e: \|e\|_3=1} e^T \mathbf{I}(\vartheta) e > 0.$$

Следуя [7], для матрицы  $\mathbf{I}(\vartheta)$  находим

$$\mathbf{I}(\vartheta) = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^K m_{k,x}^2 I_k & \sum_{k=1}^K m_{k,x} m_{k,y} I_k & v \sum_{k=1}^K m_{k,x} I_k \\ \sum_{k=1}^K m_{k,x} m_{k,y} I_k & \sum_{k=1}^K m_{k,y}^2 I_k & v \sum_{k=1}^K m_{k,y} I_k \\ v \sum_{k=1}^K m_{k,x} I_k & v \sum_{k=1}^K m_{k,y} I_k & v \sum_{k=1}^K I_k \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где

$$I_k = \int_{\tau_k(\vartheta)}^T \frac{S_k'^2(t - \tau_k(\vartheta))}{v^2 \sigma_k^2(t)} dt,$$

а  $(m_{k,x}, m_{k,y})$  – единичный вектор, который показывает направление от источника  $D_0$  на  $k$ -й датчик  $D_k$ . При этом нетрудно показать, что

$$\frac{\partial \tau_k(\vartheta_0)}{\partial x_0} = -\frac{x_k - x_0}{v \|D_k - D_0\|} = -\frac{m_{k,x}}{v}, \quad \frac{\partial \tau_k(\vartheta_0)}{\partial y_0} = -\frac{m_{k,y}}{v}, \quad \frac{\partial \tau_k(\vartheta_0)}{\partial \tau_0} = 1.$$

Обозначим через  $R_*^K$  пространство  $K$ -мерных векторов  $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_K)^T$ , для которых скалярное произведение и соответствующая норма определяются соотношениями

$$\langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle_* = \sum_{k=1}^K a_k b_k I_k, \quad \|\mathbf{a}\|_* = \sum_{k=1}^K a_k^2 I_k.$$

Тогда матрицу (12) можно переписать следующим образом

$$\mathbf{I}(\vartheta) = \begin{pmatrix} \|\mathbf{m}_x\|_*^2 & \langle \mathbf{m}_x, \mathbf{m}_y \rangle_* & \langle \mathbf{m}_x, \mathbf{n} \rangle_* \\ \langle \mathbf{m}_x, \mathbf{m}_y \rangle_* & \|\mathbf{m}_y\|_*^2 & \langle \mathbf{m}_y, \mathbf{n} \rangle_* \\ \langle \mathbf{m}_x, \mathbf{n} \rangle_* & \langle \mathbf{m}_y, \mathbf{n} \rangle_* & \|\mathbf{n}\|_*^2 \end{pmatrix},$$

где  $\mathbf{m}_x = (m_{1,x}, \dots, m_{K,x})^T$ ,  $\mathbf{m}_y = (m_{1,y}, \dots, m_{K,y})^T$ ,  $\mathbf{n} = (v, \dots, v)^T$ .

Используя результаты [7], можно показать, что для любой оценки  $\overline{\vartheta}_\varepsilon$  имеет место неравенство Гайека-Ле Кама вида

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \liminf_{\varepsilon \rightarrow 0} \sup_{\|\vartheta - \vartheta_0\|_3 < \delta} \varepsilon^{-2} \mathbf{E}_\vartheta \|\overline{\vartheta}_\varepsilon - \vartheta\|_3^2 \geq \mathbf{E}_{\vartheta_0} \|\zeta\|_3^2, \quad (13)$$

Здесь  $\zeta$  – гауссовский случайный вектор с характеристиками  $\sim N(0, \mathbf{I}_0^{-1}(\vartheta_0))$ , При этом асимптотически эффективной будет та оценка  $\vartheta_{\varepsilon}^*$ , для которой неравенство (13) переходит в равенство.

Предположим, что условия 1)-3) выполняются. Тогда согласно [9] ОМП  $\hat{\vartheta}_{\varepsilon}$  и БО  $\tilde{\vartheta}_{\varepsilon}$  параметра  $\vartheta_0$  равномерно состоятельны, равномерно на компактах асимптотически нормальны:

$$\frac{\hat{\vartheta}_{\varepsilon} - \vartheta_0}{\varepsilon} \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \zeta, \quad \frac{\tilde{\vartheta}_{\varepsilon} - \vartheta_0}{\varepsilon} \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \zeta, \quad \zeta \sim N(0, \mathbf{I}_0^{-1}(\vartheta_0))$$

и асимптотически эффективны. При этом имеет место равномерная на компактах сходимости полиномиальных моментов вида: для любого  $p > 0$  выполняются соотношения

$$\varepsilon^{-p} \mathbf{E}_{\vartheta_0} \|\hat{\vartheta}_{\varepsilon} - \vartheta_0\|_3^p \geq \mathbf{E}_{\vartheta_0} \|\zeta\|_3^p, \quad \varepsilon^{-p} \mathbf{E}_{\vartheta_0} \|\tilde{\vartheta}_{\varepsilon} - \vartheta_0\|_3^p \geq \mathbf{E}_{\vartheta_0} \|\zeta\|_3^p.$$

### **Оценка времени начала излучения и координат источника сигнала: второй подход**

При втором подходе по реализации наблюдаемых данных  $X_k^T$ , зарегистрированной  $k$ -м датчиком, одним из возможных способов (байесовским, максимально правдоподобным) строится оценка  $\tau_{k,\varepsilon}^*$  момента  $\tau_{0,k} = \tau_k(\vartheta_0) \in T_k$  прихода сигнала от источника излучения на датчик. Здесь  $T_k$  – множество допустимых моментов прихода сигнала на  $k$ -й датчик. Затем, на основе сформированных оценок  $\tau_{k,\varepsilon}^*$ ,  $k = \overline{1, K}$  одним из возможных способов (например, МНК) строится оценка  $\vartheta_{\varepsilon}^* = (x^*, y^*, \tau^*)$  параметра  $\vartheta_0 = (x_0, y_0, \tau_0)$ . Как отмечалось выше, использование МНК позволяет предложить метод построения линейной оценки  $\vartheta_{\varepsilon}^*$ , для которой удастся доказать состоятельность и асимптотическую нормальность.

### **Заключение**

В работе рассмотрена задача определения местоположения источника и момента начала излучения им пуассоновских или гауссовских сигналов набором датчиков, распределенных на плоскости. Наряду с классическими (максимально правдоподобным и байесовским) подходами предложен способ оценки координат источника излучения, основанный на измерении задержек принимаемых датчиками сигналов и последующего применения метода наименьших квадратов. В результате удастся получить технически простой алгоритм построения линейной оценки, обладающей свойствами состоятельности и асимптотической нормальности.

С использованием обобщений метода Ибрагимова-Хасьминского найдены асимптотические характеристики выносимых оценок при наличии сингулярностей различных типов. Показано, что в условиях высокой апостериорной точности характеристики максимально правдоподобного и байесовского алгоритмов измерения неизвестных параметров регулярных



пуассоновских и гауссовских сигналов совпадают. Получаемые при этом оценки являются асимптотически нормальными, асимптотически состоятельными и асимптотически эффективными. В то же время при наличии сингулярностей типа «касп» и «скачок» по измеряемым параметрам, несмотря на одинаковый характер стремления максимально правдоподобной и байесовской оценок к истинному значению оцениваемого параметра с ростом числа наблюдений, эффективной оказывается только байесовская оценка. Максимальная скорость сходимости максимально правдоподобной и байесовской оценок наблюдается при сингулярностях типа «скачок», минимальная – в регулярном случае.

Полученные результаты могут быть использованы для решения ряда актуальных задач мониторинга, например, задачи обнаружения нескольких источников, задачи сопровождения движущегося объекта, задачи обнаружения источников по измеренным углам прихода принимаемых от них сигналов и т.д.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSWF-2020-0022).*

#### **Список литературы**

1. Handbook of position location: Theory, practice, and advances / Edited by R. Zekavat, R.M. Vuehrer. – Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2019. – 1376 p.
2. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
3. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. – М.: Сов. радио, 1978. – 296 с.
4. Chernoyarov O.V., Kutoyants Yu.A. Poisson source localization on the plane: the smooth case // *Metrika*. – 2020. – Vol. 83. – No. 4. – P. 411-435.
5. Chernoyarov O.V., Dachian S., Kutoyants Yu.A. Poisson source localization on the plane: cusp case // *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*. – 2020. – Vol. 72. – No. 5. – P. 1137-1157.
6. Farinetta C., Kutoyants Yu.A., Top A. Poisson source localization on the plane: change-point case // *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*. – 2020. – Vol. 72. – No. 3. – P. 675-698.
7. Kutoyants Yu.A. On localization of source by hidden Gaussian processes with small noise // *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, in press.
8. Arakelyan N.V., Kutoyants Yu.A. On the identification of the source of emission on the plane // *Proceedings of the Yerevan State University, Physical and Mathematical Sciences*. – 2019. – Vol. 53. – No. 2. – P. 75-81.
9. Chernoyarov O.V., Dachian S., Farinetta C., Kutoyants, Yu.A. Estimation of the position and time of emission of a source, submitted.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ ДЛЯ ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

**В.А. Довгаль, С.К. Куижева**

*vdovgal@mkgtu.ru*

*Майкопский государственный технологический университет,  
Россия, г. Майкоп*

В условиях цифровизации всех аспектов окружающего мира особую актуальность приобретают данные, как один из самых ценных ресурсов [1]. Понятие «больших данных» означает огромный объем информации, размер которой слишком велик, либо она слишком быстро создается или имеет структуризацию, не позволяющую обработать ее с помощью традиционных средств систем управления данными. В настоящее время большие массивы данных и аналитика все чаще используются государственными учреждениями, неправительственными организациями и частными компаниями в области охраны окружающей среды. Диапазон практического использования этой технологии достаточно широк: начиная от повышения энергоэффективности, отслеживания изменения климата на больших промежутках времени, мониторинга качества воды, и заканчивая содействием экологического правосудия.

В настоящей статье описаны несколько крайне перспективных применений больших наборов данных и их аналитики, которые могут помочь достижению целей охраны окружающей среды и устойчивом развитии, обеспечить экологические преимущества, помочь исследованиям окружающей среды, ее сохранению и защите. Широкое внедрение решений по обработке больших данных позволяет проиллюстрировать диапазон инициатив и подходов по уменьшению нагрузки на окружающую среду, применяемых правительственными учреждениями, неправительственными организациями и частными компаниями.

## 1. Понятие больших данных

Согласно закону экспоненциального роста объема знаний с каждым годом знания, которыми располагает человечество, удваивается. И для их обработки применяются всё более быстродействующие вычислительные устройства. Как результат, какой-либо процесс или явление всё чаще можно описать, подчеркивая аспекты размера данных, с помощью сверхбольших массивов информации, которые не были перспективно ограничены по размеру или объему намерением решить конкретные исследовательские вопросы [2, с. 976]. Эти быстрорастущие данные представляют все больший интерес как для ученых, так и для практических работников. В базах данных информация представлена в различном виде: текстовый контент (т.е. имеет вид структурированного, полуструктурированного и неструктурированного вида), мультимедийный контент (например, видео, изображения, аудио) или интегрированные платформы (например, межмашинные коммуникации, сайты социальных сетей, сенсорные сети и Интернет вещей) [3]. Помимо этого содержание данных постоянно меняется из-за поглощения дополнительных

коллекций данных, введения ранее архивированных данных или устаревших коллекций, а также добавления потоковых данных, поступающих из нескольких источников [4]. Очень часто большие данные описываются противопоставлением трех присущих им основных характеристик: "Volume (объем)", "Velocity (быстрота)" и "Variety (разнообразие)" [5]. Признак "Объем" характеризует размер данных, который непрерывно увеличивается. "Разнообразие" описывает наличие различных типов данных, собранных с использованием разнообразных технологий или источников, таких как датчики, смартфоны или социальные сети. Признак "Быстрота" является характеристикой скорости передачи данных. В последнее время некоторые вновь появившиеся концепции добавляют к характеристикам больших данных еще две буквы V – "Value (ценность)" и "Veracity (достоверность)". Ценность данных проявляется в обнаружении скрытых значений, которые могут обеспечить повышение доходности компании или устранение потерь для клиента в потоке создания ценности, актуальном в процессах бережливого производства [6]. "Достоверность" подчеркивает не только важность качественных данных, но и связанный с ним уровень безопасности используемой информации [7].

## 2. Перспективные преимущества использования больших данных

Начиная с момента своего появления, большим данным приписывалась способность произвести революцию в искусстве управления [7]. С организационной точки зрения большие данные могут проявить себя во всех областях деятельности компании для совершенствования продукта и рынка, повышения операционной эффективности, для выдачи более корректных прогнозов рыночного спроса, позволят принимать правильные бизнес-решения, открывая конкурентные преимущества в области стратегической дифференциации затрат. Охрана окружающей среды, как вид деятельности человека, также не является исключением, т.к. основана на использовании собираемой информации и анализе данных, в том числе больших размеров.

Реальные бизнес-модели могут быть построены исходя из следующих подходов: дифференциация информации, посредничество в предоставлении информации и информационные сети [8]. Первый подход, использующий информацию, извлеченную из больших данных, позволяет создавать новые разнообразные предложения, диверсифицируя бизнес компании. На основе поведения клиентов можно предлагать новые услуги, повышать удовлетворенность и обеспечивать контекстуальную релевантность.

Подход, связанный с посредничеством информации, позволяет извлечь прибыль за счет коммерциализации принадлежащих компании больших данных. Таким образом, бизнес-возможности проявляются и при продаже необработанной (первичной) информации, и выполнении анализа рыночной практики, и предоставлении результатов анализа и выводов по нему. Третий подход, связанный с созданием сетей для доставки данных, реализует возможность агрегации информации, последующий ее обмен и преобразование, стимулирующее появление новых данных. С точки зрения

охраны окружающей среды перспективными представляются все три подхода к использованию больших наборов данных.

Таким образом, компании, обладающие большими данными, могут извлекать выгоду из образующегося у них переизбытка информации. Поэтому появление мощных интеллектуальных решений в области обработки больших данных и аналитики в настоящее время является весьма актуальной задачей для исследования и анализа потока информации, т.к. оно способно привести к фундаментальному изменению способа управления повседневной деятельностью организаций. Ведь получаемые от больших данных и аналитических результатов преимущества весьма существенны: это дифференциация от своих конкурентов.

3. Примеры использования больших данных в области сохранения и устойчивого развития

Очевидно, что и в области исследования окружающей среды большие данные также могут быть полезны, позволяя выявить ключевые условия и тенденции в экологическом состоянии конкретных, регионов, стран и планеты в целом. Анализ больших данных способен принести большую пользу, будучи подкрепленным постоянными усилиями по обеспечению устойчивого развития.

Применение больших данных на основе методов сбора, обработки, анализа и визуализации наборов данных, появляющихся и внедряющихся в последние десятилетия, позволил ученым-биогеофизикам обнаружить, проанализировать и понять изменения окружающей среды в микро- и глобальных масштабах, а также отделить те из них, которые обусловлены влиянием человека. Сформировались тенденции, вытекающие из экологических анализов имеющихся наборов больших данных, просматриваются перспективы использования этих технологий для смягчения глобального экологического спада.

Примеров активного использования больших данных для защиты окружающей среды можно приводить очень много. Рассмотрим те из них, которые наиболее значимы и популярны в сети Интернет.

А. Сохранение биоразнообразия растений, животных и ландшафтов во всем мире

Одним из примеров международных организаций, функционирующих в этом направлении, можно назвать Conservation International [9]. Она занимается защитой природы, привлекая внимание к этому виду деятельности и обеспечивая важнейшие блага, которые природа предоставляет человечеству. При этом используются лучшие достижения науки, инновационная политика и глобальный охват (офисы организации имеются в более чем двух десятках стран, а всемирная сеть охватывает тысячи партнеров). Основную роль в защите природы, от которой человечество зависит в плане обеспечения продовольствия, пресной воды и средств к существованию, играет анализ ситуации с помощью больших данных. Фотоловушки, установленные в различных тропических лесах мира и работающие удаленно, позволяют специалистам организации получить и

сохранить в базе данных около 500 тысяч необработанных изображений в год. Эти снимки используются для построения ежегодной бинарной матрицы для каждого вида на каждом участке, где расположены камеры-ловушки. Затем ученые создают индекс изображений дикой природы (Wildlife Picture Index, WPI), который можно использовать для моделирования изменения популяции животных в той или иной среде, в той или иной местности. Система WPI Analytics обладает высокой точностью данных, своевременным выполнением анализа – актуализация свежих данных происходит в реальном времени за счет использования мощных серверов. Результаты обработки позволяют ученым разрабатывать методики, помогающие сохранить популяцию: прикорм животных, искусственные условия содержания, оплодотворение, изменение туристических троп и т.п.

WPI используют исследователи из командных центров Conservation International, ученые из Смитсоновского института тропических исследований (Smithsonian Tropical Research Institute) и Общества охраны дикой природы (Wildlife Conservation Society), руководители национальных парков. Сайт с данными WPI [10] уже пополняется и данными других групп, которые были собраны аналогичным образом.

На территории Российской Федерации с подобным проектом работает Всемирный фонд дикой природы (World Wildlife Fund, WWF), который устанавливает фото-ловушки в особо охраняемых природных территориях по всей стране. В настоящее время в заповедниках и национальных парках России сотрудники Фонда разместили свыше 650 таких устройств [11].

**В. Решение мировых продовольственных проблем на основе успешного сочетания цифровых и физических технологий**

Применение больших данных и продвинутой аналитики позволяет решать проблему голода в мире. В качестве примера таких решений можно привести проприетарную платформу данных Cargill Data Platform (CDP) [12]. Она позволяет структурировать спутниковые снимки, сделанные на низкой околоземной орбите и очень сложные изображения, распознавая зоны с дойными и мясными сельскохозяйственными животными или пропашными культурами. На основе искусственного интеллекта можно прогнозировать урожай и обеспечивать оптимальные решения на ферме. Другой пример: в мире уже существует несколько сотен креветочных ферм на платформе iQuatic, которая собирает информацию из креветочных прудов и использует искусственный интеллект и приложение визуализации для выращивания креветок как чрезвычайно важного источника белка. Для обеспечения прозрачности и прослеживаемости всей цепочки поставок клиентам компаний можно использовать технологии распределенных реестров, широко известной как блокчейн.

**С. Борьба с изменением климата**

Уже давно большие данные используются в климатологии для оценки ущерба, наносимого загрязнителями и парниковыми газами. Для оценки экологического воздействия производимых продуктов необходимо обработать большой объем данных, которые собраны обширными сетями

интернета вещей [13], охватывающими почти каждый сектор обрабатывающей и пищевой промышленности. В мире появляются компании, которые уже являются пионерами в использовании больших данных для нахождения более экологичных рынков. В качестве примеров можно назвать реестры квот на выброс углерода, которые недавно появились в США или технологии, разрабатываемые Oxy Low Carbon ventures, позволяющие торговать этими квотами так же, как и сырьевыми товарами [14].

Кроме этого, достаточно часто инструменты, основанные на больших данных, применяются для мониторинга сезонных колебаний в изменении климата [15], управления рисками изменения климата [16] и т.п.

D. Мониторинг Антарктического ледяного покрова (The Antarctic Ice Sheet)

Ученые считают Антарктический ледяной покров важным индикатором изменения климата и движущей силой повышения уровня моря. Для наблюдения за изменением его объема, потока и гравитационного притяжения используются данные, полученные со спутников, на основе которых выполняется моделирование баланса его поверхностной массы. В качестве примера можно привести совместное исследование НАСА и Европейского космического агентства, которое показало, что Антарктида потеряла  $2720 \pm 1390$  миллиарда тонн льда в период с 1992 по 2017 год (что соответствует повышению уровня моря на  $7,6 \pm 3,9$  мм) [17].

E. Города, управляемые данными (data driven city, DDC)

Современные города используют новейшие технологии, чтобы поддерживать устойчивое развитие и высокий уровень жизни в условиях стремительного роста численности населения, увеличения территории муниципалитета и усложнения его инфраструктуры. Одной из наиболее актуальных задач в таком городе является сокращение отрицательного воздействия на окружающую среду. В мире уже реализовано много проектов в этой категории. В качестве примера можно привести совместный пилотный проект Национального центра ИКТ Австралии (NICTA) и Департамента защиты окружающей среды штата Новый Южный Уэльс (NSW EPA), в котором предусмотрен сбор данных о состоянии атмосферы с установленных сенсоров в области Hunter Valley [18]. Анализ полученной информации, проведенный с использованием методов машинного обучения и алгоритмов прогнозирования, позволяет рассчитать индекс качества воздуха AQI (air quality index) на ближайшие сутки. Этот показатель позволяет спрогнозировать уровень загрязненности воздуха на ближайшие 24 часа в различных районах штата. На основе этого индекса различные предприятия в сфере промышленного производства могут принимать соответствующие меры по поддержанию качества воздуха на уровне, соответствующем норме. Кроме контроля загрязнения воздуха похожим образом на основании данных с установленных датчиков можно контролировать городской шум, воздействие на окружающую среду строительных работ, состав и состояние зеленых насаждений в городе.

## Ф. Уход за городскими парками

Обрезка и уход за деревьями в городских скверах и парках является вопросом общественной безопасности. Например, в Нью-Йорке насчитывается около 2,5 миллионов деревьев, требующих ухода, без которого они могут нанести вред жителям города – падающие ветви деревьев могут серьезно ранить гуляющих под ними людей или привести к летальным случаям. Обрезка и другие виды ухода за деревьями считаются способом повышения их устойчивости к шторму или ураганному ветру, что поможет уменьшить вероятность материального ущерба, травм и смертей. Для лучшего профилактического ухода за городскими деревьями парки Нью-Йорка создали программу регулярной обрезки и ухода за большими деревьями. Затем с помощью технологии больших данных специалисты некоммерческой организации DataKind сравнили график обрезки в течение одного года и информацию об удалении упавших веток и поваленных деревьях [19]. Используемые наборы данных имели различные уровни детализации – выполнение обрезки фиксировалось поблочко, в то время как данные об очистке были записаны на уровне адреса. Приведя имеющиеся данные по одному городскому кварталу в соответствие друг другу, анализ больших данных на основе интенсивного моделирования позволил сделать вывод: обрезка деревьев для предотвращения определенных видов опасностей привела к 22-процентному сокращению числа вызовов бригады для экстренной очистки. Вторая фаза – интеллектуальная обрезка – позволяет определить расстановку приоритетов в обслуживании городских кварталов. Необходимо построить профиль риска блока: количество деревьев и их типы, нахождение блока в зоне наводнения или шторма, другие сопутствующие неблагоприятные факторы. Теперь администрация города может эффективно использовать инвестиции, вкладываемые в инфраструктуру городских парков.

## Г. Появление уточненных карт с локализованными данными

Повышение объективности собранных данных обеспечивается достаточно высоким интеллектуальным уровнем датчиков, которые становятся все более тонкими, гибкими, экономичными и экологичными, применяющими нанотехнологичные решения. Миниатюризация сенсоров способствует их активному внедрению в мобильные устройства, а, следовательно, теперь они могут быть использованы повсеместно во всё большем количестве приложений для сбора данных об окружающей среде.

Встроенные в смартфон датчики, не зависимо от местоположения его обладателя, позволяют создать сеть персональных датчиков окружающей среды, а значительное количество людей, участвующих в подобных проектах, может обеспечить предоставление точных экологических данных посредством краудсорсинга заинтересованной стороне [20]. Собранный таким способом, массив больших данных позволит в реальном времени создавать карты сильно локализованных данных о параметрах окружающей среды (например, температуры, NO<sub>2</sub> и уровнях твердых частиц в воздухе) и даже обнаруживать токсичные химические утечки. Такая информация будет актуальна для людей, проживающих рядом с федеральными трассами,

многоэтажными автостоянками или около промышленных объектов. Экологическая ситуация на таких объектах обычно контролируется датчиками состояния окружающей среды, находящимися в ведении государственных органов или станций мониторинга, и не дает полной картины.

Наличие конкретной информации в режиме реального времени не только может позволить избежать проблем с самочувствием больным людям и знать районы, которых следует избегать в любой день, но и дает ученым более корректную карту мест загрязнения, их причин и распределения по времени. На основании полученной информации можно разработать план совершенствования экологической ситуации.

Кроме того, можно назвать исследования, в которых обработка временных данных огромного размера о ночных огнях, лесных пожарах, новостных базах данных и фотографиях Flickr позволила почти в режиме реального времени идентифицировать объекты Всемирного наследия, затронутые конфликтом [21]. Нестандартным примером анализа больших данных является автоматизированная система слежения и мониторинга за морскими судами, предсказывающая незаконный промысел в режиме реального времени [22]. Используя группировку спутников и наземных приемников, модель может выявлять подозрительное поведение судов, что позволяет правительствам проводить целенаправленные расследования в отношении конкретных судов, осуществляющих незаконную деятельность в их водах. Помимо экологического правосудия такая система позволяет сохранять потенциал морских ресурсов, предотвращая нерегулируемую рыболовную деятельность.

Таким образом, мы находимся на пороге широкого внедрения технологий больших данных в окружающий нас мир и его охрану. В настоящее время большие данные можно использовать для экологического прогнозирования процессов принятия решений как в государственном, так и в частном секторах. Следует подчеркнуть, что, для решения проблем устойчивого развития важно поддерживать тесные связи между лицами, принимающими решения, и теми, кого они затрагивают. Анализ больших данных позволяет лишь предоставить органам, охраняющим окружающую среду, подробные доказательства быстрых изменений в природе: от документирования экологичности нашей планеты до выявления мест, где незаконно добываются ресурсы. В конечном счете, должна существовать тесная связь между анализом больших данных и программой устойчивого развития, чтобы гарантировать, что человечество еще имеет время и пространство для спасения не только окружающей нас среды, но и самого человечества.

### **Список литературы**

1. Dovgal, V. A. Decision-making for placing unmanned aerial vehicles to implementation of analyzing cloud computing cooperation applied to information processing / V. A. Dovgal // Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 мая 2020 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9111975. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111975.



2. K.R. Ghani, K. Zheng, J.T. Wei, C.P. Friedman, Harnessing big data for health care and research: are urologists ready? *Eur. Urol.* 66 (6) (2014) 975–977.
3. U. Sivarajah, M.M. Kamal, Z. Irani, V. Weerakkody, Critical analysis of Big Data challenges and analytical methods, *J. Bus. Res.* 70 (1) (2017) 263–286.
4. J.J. Berman, *Principles of Big data: preparing, sharing, and Analyzing Complex Information* Waltham, Morgan Kaufmann, MA, 2013.
5. H. Chen, R.H. Chiang, V.C. Storey, Business intelligence and analytics: from big data to big impact, *MIS Q.* 36 (4) (2012) 1165–1188.
6. Карамушко Г.В., Довгаль В.А. Материалы по организации и проведению на Фабрике процессов обучающего кейса по основам бережливого производства "Картирование потока создания ценности" // Свидетельство о регистрации базы данных 2020622312, 18.11.2020. Заявка № 2020622154 от 03.11.2020.
7. S.F. Wamba, A. Gunasekaran, S. Akter, S.J.F. Ren, R. Dubey, S.J. Childe, Big data analytics and firm performance: effects of dynamic capabilities, *J. Bus. Res.* 70 (2017) 356–365.
8. R. Wang, What a big-data business model looks like, *Harv. Bus. Rev. Website* (2012) [Электронный ресурс] <https://hbr.org/2012/12/what-a-big-data-business-model> (дата обращения: 11.04.2021).
9. Conservation International, [Электронный ресурс] URL: <https://www.conservation.org/> (дата обращения: 11.04.2021).
10. The TEAM Network is moving to Wildlife Insights. URL: <https://www.wildlifeinsights.org/team-network> (дата обращения: 11.04.2021).
11. Присматривай за природой с помощью фотоловушек WWF [Электронный ресурс] URL: <https://wwf.ru/smotri/> (дата обращения: 14.04.2021).
12. How Cargill IT is helping to solve the world's food problems [Электронный ресурс] URL: <https://www.cio.com/article/3602029/how-cargill-it-is-helping-to-solve-the-worlds-food-problems.html> (дата обращения: 12.04.2021).
13. Vitaly A. Dovgal, Pavel Yu. Buchatskiy, Victoria V. Buchatskaya and Semen V. Teploukhov. Analysis of impact of the Internet of things on the prospects for development of e-learning // В сборнике: CEUR Workshop Proceedings. SLET 2021 – Proceedings of the International Scientific Conference Innovative Approaches to the Application of Digital Technologies in Education and Research. 2021.
14. How Big Data Helps in the Fight Against Climate Change [Электронный ресурс] URL: <https://insidebigdata.com/2020/08/23/how-big-data-helps-in-the-fight-against-climate-change/> (дата обращения: 10.04.2021).
15. Manogaran, G., and Lopez, D. (2018). Spatial cumulative sum algorithm with big data analytics for climate change detection. *Comput. Electr. Eng.* 65, 207–221. doi: 10.1016/j.compeleceng.2017.04.006.
16. Ford, J.D., Tilleard, S. E., Berrang-Ford, L., Araos, M., Biesbroek, R., Lesnikowski, A.C., et al. (2016). Opinion: Big data has big potential for applications to climate change adaptation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113, 10729–10732. doi: 10.1073/pnas.1614023113.
17. Shepherd, A., Ivins, E., Rignot, E. et al (2018) Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 558 . pp. 219–222. ISSN 0028-0836. [Электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>.
18. Города, управляемые данными [Электронный ресурс] URL: [https://www.pwc.ru/ru/government-and-public-sector/assets/ddc\\_rus.pdf](https://www.pwc.ru/ru/government-and-public-sector/assets/ddc_rus.pdf) (дата обращения: 10.04.2021).
19. New York Turns to Big Data to Solve Big Tree Problem, [Электронный ресурс] URL: <https://www.cio.com/article/2385245/new-york-turns-to-big-data-to-solve-big-tree-problem.html> (дата обращения: 12.04.2021).
20. Довгаль В.А., Довгаль Д.В. Использование Интернета вещей для охраны окружающей среды // В сборнике: Фундаментальные и прикладные аспекты геологии,

геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы V Международной научно-практической конференции. 2019. С. 152-157.

21. Levin, N., Ali, S., Crandall, D. & Kark, S. World Heritage in danger: big data and remote sensing can help protect sites in conflict zones. *Glob. Environ. Chang.* 55, 97–104 (2019).

22. Peel, David & Kroodsma, David & Hardesty, Britta & Rosebrock, Uwe & Wilcox, Chris. (2018). Detecting suspicious activities at sea based on anomalies in Automatic Identification Systems transmissions. *PLOS ONE*. 13. e0201640. 10.1371/journal.pone.0201640.

# СТРУКТУРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗАДЕРЖКАМ ИЗЛУЧАЕМЫХ ИМИ СИГНАЛОВ

<sup>1</sup>В.П. Дубыкин, <sup>2</sup>А.А. Макаров, <sup>2,3</sup>О.В. Черноярков

*chernoyarovov@tpei.ru*

<sup>1</sup>*Воронежский государственный технический университет,*

*Россия, г. Воронеж*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, г. Москва*

<sup>3</sup>*Майкопский государственный технологический университет,*

*Россия, г. Майкоп*

## **Введение**

В настоящее время вопросам измерения координат источников радиоизлучений (ИРИ) многопозиционными пассивными радиолокационными системами уделяется большое внимание [1-4]. В [1, 2] описаны особенности функционирования данных систем и подробно рассмотрены следующие методы определения координат ИРИ: эллиптический, гиперболический, триангуляционный, а также их сочетания. Показано, что в тех случаях, когда нельзя измерить время распространения радиосигнала ИРИ до каждой из приёмных позиций (ПП) системы и не требуется знать априори форму и момент излучения принимаемых сигналов для определения координат ИРИ (в том числе и источников активных помех) целесообразным является применение гиперболического метода, основанного на составлении нелинейных уравнений, определяющихся геометрией разностно-дальномерной системы (РДС), в сочетании с различными аналитическими или численными способами их решения. Однако подобный подход не учитывает флуктуационных свойств обрабатываемых сигналов и, как следствие, не позволяет получать оптимальные в статистическом смысле оценки координат ИРИ, обеспечивающие минимальную среднеквадратическую ошибку (СКО) [5]. Поскольку при определении местоположения ИРИ, как правило, выполняются обычные условия регулярности [6], в качестве оценок неизвестных координат, обладающих минимальным рассеянием, могут выступать оценки максимального правдоподобия [6,7].

Целью настоящей работы является разработка максимально правдоподобного алгоритма определения координат ИРИ на основе предложенной модификации гиперболического метода с определением потенциальной точности их измерений. При этом предполагается учесть наличие дополнительных взаимосвязей координат ИРИ со статистическими свойствами случайных ошибок измерений разностей расстояний от ИРИ до ПП через закон распределения взаимных задержек распространения сигнала ИРИ до двух соседних ПП РДС.

## **Особенности и условия функционирования РДС**

В качестве особенностей и условий функционирования РДС примем следующие [1,2].

1. Будем считать [1,2], что определение координат ИРИ происходит на плоскости. Тогда геометрическую структуру РДС можно представить в виде произвольного плоского многоугольника, в вершинах которого располагаются ПП. Обозначим  $(x_i, y_i)$  – координаты  $i$ -ой ПП ( $i = 0, M-1$ ) в декартовой правой системе координат ХОУ,  $B_{im}$  – расстояние (база) между двумя соседними ПП,  $M$  – число ПП, а  $(x, y)$  – текущие координаты ИРИ. Поскольку геометрическая структура рассматриваемой РДС является замкнутой, нумерация ПП может начинаться с любой приемной позиции РДС и продолжаться по контуру структуры в направлении против хода часовой стрелки. При этом обозначение баз осуществляется двумя индексами  $i$  и  $m$ , где  $m = i+1$ , если  $i = 0, 1, \dots, M-2$ , и  $m = 0$ , если  $i = M-1$ . В частности, для трехпозиционной структуры РДС, рассмотренной ниже, имеются три базы с обозначениями  $B_{01}$ ,  $B_{12}$ ,  $B_{20}$ .

2. Исходными данными для алгоритма оценки координат ИРИ являются измеряемые РДС взаимные задержки  $\tau_{im}$  распространения сигнала ИРИ до каждой двух соседних ПП, разнесенных на базы  $B_{im}$ . Это позволяет исключить зависимость алгоритма оценки от времени начала излучения сигнала ИРИ, которое в большинстве практически важных случаев неизвестно наблюдателю.

3. Полагаем, что ошибки измерения координат ИРИ подчиняются нормальному закону распределения, а измерения  $\tau_{im}$  по каждой базе  $B_{im}$  являются независимыми.

4. В качестве критерия оптимальности измерения координат ИРИ используется критерий максимального правдоподобия [2].

5. Для получения максимально правдоподобной оценки координат ИРИ и корреляционной матрицы ошибок их измерений используется итерационный метод [1-4], согласно которому на каждом  $n$ -ом шаге ( $n = 1, 2, \dots$ ) итерационного процесса формируется условная апостериорная плотность вероятности координат  $w(x, y | x_{n-1}, y_{n-1})$  при условии, что на предыдущем шаге координаты приняли значения  $x_{n-1}, y_{n-1}$ . Итерационный процесс останавливается, когда квадрат расстояния между точками  $(x_n, y_n)$  и  $(x_{n-1}, y_{n-1})$  не превышает некоторого установленного порогового значения. Выбор начальной точки итерационного процесса с координатами  $(x_0, y_0)$  осуществляется на основе метода геометрического центра РДС, метода взвешенного (относительно принимаемой мощности сигналов ИРИ) геометрического центра РДС и метода точки пересечения асимптот гипербол всех пар баз  $B_{im}$  РДС [8]. Тогда оптимальная оценка координат ИРИ  $(\hat{x}_n, \hat{y}_n)$  определится как положение наибольшего максимума плотности вероятности  $w(x, y | x_{n-1}, y_{n-1})$  [2,9], т.е. исходя из условия

$$\max w(x_n, y_n | x_{n-1}, y_{n-1}) = w(\hat{x}_n, \hat{y}_n | x_{n-1}, y_{n-1}). \quad (1)$$

### Методика оптимальной оценки координат

Для получения координатных соотношений между координатами ПП РДС  $(X_i, Y_i)$ , которые являются известными, с координатами ИРИ  $(x, y)$ , подлежащими оценке, с учетом сделанных допущений о независимости измерений  $\tau_{im}$  и нормальности их ошибок запишем совместную плотность вероятности ошибок измерения взаимных задержек в виде

$$w(\delta\tau_{01}, \delta\tau_{12}, \delta\tau_{20}) = \prod_{(i,m)} w(\delta\tau_{im}). \quad (2)$$

Здесь  $\delta\tau_{im} = \tau_{im} - \tau_{im}^{(0)}$ ,  $\tau_{im}$ ,  $\tau_{im}^{(0)}$  – измеренные и истинные взаимные задержки, соответственно,

$$w(\delta\tau_{im}) = \exp\left[-\left(\tau_{im} - \tau_{im}^{(0)}\right)^2 / 2\sigma_{\tau_{im}}^2\right] / \sigma_{\tau_{im}} \sqrt{2\pi}, \quad (3)$$

а  $\sigma_{\tau_{im}}$  – среднеквадратическое отклонение измерения взаимных задержек.

Нетрудно видеть, что ошибки  $\delta\tau_{im}$  связаны с координатами  $(x, y)$  ИРИ соотношением

$$\delta\tau_{im} = [D_i(x, y) - D_m(x, y)]/c - \tau_{im}, \quad (4)$$

где  $D_l(x, y) = \sqrt{(x - X_l)^2 + (y - Y_l)^2}$ ,  $l = i, m$  – расстояния от ИРИ с неизвестными координатами  $(x, y)$  до  $l$ -ой ПП,  $c$  – скорость света.

Используя (2)-(4), можно получить явный вид функции  $w(x, y | x_{n-1}, y_{n-1})$ , однако возникающее при этом уравнение правдоподобия (1) будет существенно нелинейным и требовать для своего решения достаточно сложных итерационных алгоритмов. Для преодоления указанных трудностей при вычислении оценки (1) используем метод линеаризации [1,3]. Следуя [1,3], обозначим

$$\Gamma_{im} = D_i(x, y) - D_m(x, y) \quad (5)$$

и линеаризуем нелинейную функцию (5) путем ее разложения в ряд Тейлора в окрестности точки с координатами  $(x_{n-1}, y_{n-1})$ , ограничиваясь линейными членами разложения. Тогда имеем

$$\Gamma_{im}(x, y) = \Gamma_{im}(x_{n-1}, y_{n-1}) + A_{im}(x - x_{n-1}) + B_{im}(y - y_{n-1}), \quad (6)$$

где

$$A_{im} = \partial\Gamma_{im}(x_{n-1}, y_{n-1})/\partial x, \quad B_{im} = \partial\Gamma_{im}(x_{n-1}, y_{n-1})/\partial y. \quad (7)$$

Заменяя соотношения (7) уравнениями с линейными приращениями по теореме Лагранжа [10], можем записать

$$\begin{aligned} A_{im} &= \frac{x_{n-1} - X_i}{D_i(x_{n-1}, y_{n-1})} - \frac{x_{n-1} - X_m}{D_m(x_{n-1}, y_{n-1})}, \\ B_{im} &= \frac{y_{n-1} - Y_i}{D_i(x_{n-1}, y_{n-1})} - \frac{y_{n-1} - Y_m}{D_m(x_{n-1}, y_{n-1})}. \end{aligned} \quad (8)$$

Далее, подставляя (3)-(8) в (2) и осуществляя несложные преобразования, приходим к следующему выражению для апостериорной плотности вероятности координат  $(x, y)$ :

$$w(x, y|x_{n-1}, y_{n-1}) = C_1 \exp[-\lambda(x, y)/2], \quad (9)$$

где  $C_1$  – постоянный множитель, а

$$\lambda(x, y) = Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F. \quad (10)$$

В (10) обозначено

$$A = \sum_{i,m} \frac{A_{im}^2}{\sigma_{\Gamma_{im}}^2}, \quad B = \sum_{i,m} \frac{A_{im}B_{im}}{\sigma_{\Gamma_{im}}^2}, \quad C = \sum_{i,m} \frac{B_{im}^2}{\sigma_{\Gamma_{im}}^2}, \quad D = \sum_{i,m} \frac{A_{im}e_{im}}{\sigma_{\Gamma_{im}}^2}, \quad E = \sum_{i,m} \frac{B_{im}e_{im}}{\sigma_{\Gamma_{im}}^2},$$

$$F = \sum_{i,m} e_{im}^2, \quad e_{im} = \Gamma_{im} - x_{n-1}A_{im} - y_{n-1}B_{im} - c\tau_{im}, \quad \sigma_{\Gamma_{im}}^2 = c^2\sigma_{\tau_{im}}^2.$$

Согласно (1) для нахождения искомых оценок  $(\hat{x}_n, \hat{y}_n)$  необходимо максимизировать выражение (9) одним из известных способов, например, как описано в [1,3,9]. Выполняя указанную процедуру, получим соотношения

$$\frac{\partial \lambda(x, y)}{\partial x} \Big|_{x=\hat{x}_n, y=\hat{y}_n} = A\hat{x}_n + B\hat{y}_n + D = 0, \quad \frac{\partial \lambda(x, y)}{\partial y} \Big|_{x=\hat{x}_n, y=\hat{y}_n} = B\hat{x}_n + C\hat{y}_n + E = 0.$$

Отсюда следует, что максимально правдоподобные оценки координат ИРИ  $(x, y)$  определяются как

$$\hat{x}_n = (BE - CD)/(AC - B^2), \quad \hat{y}_n = (BD - AE)/(AC - B^2). \quad (11)$$

### Оценка точности измерения координат

Из теории статистических оценок известно [2,6,7], что при увеличении времени наблюдения сигнала ИРИ и/или заметного превышения сигналом ИРИ уровня шума на выходе приемника ПП, оценки максимального правдоподобия являются асимптотически несмещенными, асимптотически эффективными и асимптотически нормальными, а их корреляционная матрица является обратной к информационной матрице Фишера [1,6]. Применительно к оценкам (11) несложно показать, что корреляционная матрица  $K$  и обратная к ней матрица  $K^{-1}$  имеют вид

$$K = \begin{pmatrix} C/\Delta & -B/\Delta \\ -B/\Delta & A/\Delta \end{pmatrix}, \quad K^{-1} = \begin{pmatrix} A & B \\ B & C \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где  $\Delta = AC - B^2 \neq 0$  – определитель матрицы  $K^{-1}$ .

С другой стороны, элементы матрицы  $K$  являются элементами корреляционной матрицы ошибок и допускают представление [1-4]

$$K = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y r_{xy} \\ \sigma_x\sigma_y r_{xy} & \sigma_y^2 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $r_{xy}$  – среднеквадратические отклонения и коэффициент корреляции оценок координат, соответственно.

Сопоставляя (12), (13), для ошибок измерения координат ИРИ находим

$$\sigma_x^2 = C/\Delta, \quad \sigma_y^2 = A/\Delta, \quad r_{xy} = -B/AC. \quad (14)$$

### Последовательность проведения расчетов

Для разработанного алгоритма последовательность определения координат ИРИ и оценка точности их измерения может быть представлена следующим образом.

1. В прямоугольной (декартовой) правой системе координат задаются координаты ПП РДС (которые являются известными) и вводятся координаты ИРИ (которые являются неизвестными);

2. С использованием соотношений (4), (5) и выбранной геометрии РДС определяются разности дальностей  $\Gamma_{im}$  между ПП, образующими базу  $V_{im}$ , и ИРИ;

3. В соответствии с (6) и (8) осуществляется разложение функций  $\Gamma_{im}$  в ряд Тейлора до первой степени разложения по каждой переменной включительно;

4. Формируется условная плотность вероятности координат  $(x, y)$  (9) и ее квадратичная форма (10);

5. Максимизируется функция (9) и по формулам (11) определяются оптимальные (максимально правдоподобные) координаты ИРИ;

6. Оценка потенциальной точности измерения полученных координат осуществляется с использованием соотношений (12)-(14).

### Проверка работоспособности алгоритма

Для подтверждения работоспособности предложенной методики и синтезированного на ее основе алгоритма измерения местоположения ИРИ было проведено математическое моделирование (с использованием пакета прикладных программ MATLAB) процесса функционирования трехбазовой РДС, приемные позиции которой располагались в вершинах равностороннего треугольника с центром в начале координат и величиной базы  $V_{im} \approx 10$  км. Полоса пропускания приемников РДС принималась равной 20 МГц, а ширина спектра сигналов ИРИ изменялась в пределах от 20 до 200 кГц. При этом излучаемая мощность составляла 10 Вт.

В качестве тестового сигнала использовался сигнал с линейной частотной модуляцией как наиболее просто реализуемый из широко используемых на практике и позволяющий регулировать ширину спектров сигналов от различных ИРИ. Математическая модель тестового сигнала на входе приемных устройств ПП РДС записывалась в виде

$$S_m(t) = \sum_{l=1}^L \sqrt{\frac{P_{cl}}{4\pi D_{ml}^2}} \cos \left[ 2\pi f_{cl}(t - \tau_{ml}) + \frac{\pi \Delta f_{cl}}{T_{cl}} (t - \tau_{ml})^2 \right] + \frac{\xi_{gauss}(t)}{q_m} \sqrt{\sum_{l=1}^L \frac{P_{cl}}{4\pi D_{ml}^2}},$$

где  $L$  – число ИРИ;  $P_{cl}$ ,  $T_{cl}$ ,  $f_{cl}$ ,  $\Delta f_{cl}$  – мощность излучения, длительность, несущая частота и ширина полосы частот сигнала  $l$ -го ИРИ, соответственно;  $D_{ml}$  и  $\tau_{ml}$  – расстояние и задержка в распространении сигнала от  $l$ -го ИРИ до  $m$ -ой ПП;  $\xi_{gauss}(t)$  – гауссовский случайный процесс с нулевым средним,

единичной дисперсией и равномерной спектральной плотностью в рабочей полосе частот ПП;  $q_m^2$  – отношение сигнал/помеха (по мощности) на входе приемного устройства  $m$ -ой ПП. Такое представление тестового сигнала является удобным с точки зрения физической интерпретации, так как позволяет трактовать второе слагаемое в общем выражении как напряжение шумовой помехи (шума), распределенной по нормальному закону.

Некоторые результаты моделирования для различных методов выбора опорной точки  $(x_0, y_0)$  показаны в таблице. Представленные здесь значения получены путем усреднения по 100 измерениям координат ИРИ при фиксированных длительности каждого измерения, координатах ИРИ и условиях приема.

Таблица

Результаты моделирования работы алгоритма оценки координат источника радиоизлучения для различных методов выбора опорной точки

Дальность, км	Методы выбора опорной точки					
	Геометрический центр		Взвешенный центр		Пересечения асимптотикой гипербол	
	СКО, м	Количество итераций	СКО, м	Количество итераций	СКО, м	Количество итераций
5	2,72	3	1,76	3	0,317	3
8	2,13	4	1,43	3	3,53	4
10	2,17	7	1,48	4	4,3	12
12	3,0	9	2,43	9	5,74	16

Анализ результатов моделирования показывает, что разработанный алгоритм определения местоположения ИРИ является работоспособным и позволяет оценивать эффективность функционирования РДС в широком диапазоне условий, как по координатной обстановке, так и по помеховой. Дополнительным преимуществом данного алгоритма является возможность его использования для оценки оперативной обстановки при работе РДС по нескольким целям (ИРИ) а также при различных (в зависимости от решаемых задач) методах выбора опорной точки для итерационной процедуры.

### **Заключение**

Разработан алгоритм оптимального определения координат и потенциальной точности их измерения гиперболическим методом. Определение оптимальных координат ИРИ и оценка их точности осуществляется через условную апостериорную плотность вероятности координат с использованием статистических методов оценки и свойств матрицы Фишера. Алгоритм реализует основные аналитические соотношения в явном виде, что позволяет разработчикам процесса организации измерений на всех его этапах осуществлять в оперативном порядке различные предварительные экспертные оценки. В качестве исходных данных для предложенного алгоритма используются взаимные задержки сигналов излучающих объектов при распространении до каждой пары приемных



позиций, оптимальные оценки измерения которых являются максимально правдоподобными.

Оптимальная оценка координат источника радиоизлучения реализована на основе пошаговой процедуры с определением погрешности производимых измерений. Показано, что структура алгоритма позволяет при необходимости осуществлять межфилтровую обработку сигналов, позволяющую осуществлять их идентификацию относительно принадлежности к “своему” источнику радиоизлучения. Работоспособность и эффективность предложенного алгоритма определения местоположения источника радиоизлучения подтверждены методами статистического имитационного моделирования.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FSWF-2020-0022).*

### **Список литературы**

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Радиотехнические системы: учебник. / Ю.М. Каазиринов, Ю.А. Коломенский, В.М. Кутузов и др.; Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 589 с.
3. Proakis J.G. Digital communication. – New York: McGraw-Hill Education, 2001. – 1150 p.
4. Hamkins J., Zeqer K. Improved bounds on maximum size binary radar array // IEEE Transactions on Information Theory. – 1997. – Vol. 43. – No. 3. – P. 997-1000.
5. Паршин Ю.Н., Льюнг Ч.В. Статистический синтез и анализ гибридного алгоритма определения координат источника радиоизлучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – № 1 (11). – С. 16-27.
6. Kutoyants Y.A. Identification of dynamical systems with small noise. – Dordrecht: Kluwer, 1994. – 298 p.
7. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
8. Дубыкин В.П., Матвеев Б.В., Степаненко Р.В., Саликов А.А. Оценка влияния выбора опорной точки для итерационной процедуры определения координат источника радиоизлучений в разностно-дальномерной системе // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – № 3. – С. 9-12.
9. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. – М.: Техносфера, 2007. – 488 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников. – М.: Наука, 1984. – 831 с.

## ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ АРКТИЧЕСКИХ ОСТРОВОВ

**Е.Ю. Жданова**

*ekaterinazhdanova214@gmail.com*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Россия, г. Москва*

Под влиянием климатических изменений, которые особенно отчетливо проявляются в арктической зоне, происходит изменения береговой линии арктических островов. Факторами изменения береговой линии являются, в том числе, таяние мерзлых грунтов под влиянием изменения температурного режима, механическое разрушение берегов, которое происходит за счет волновой активности при изменении продолжительности периода с ледовым покровом.

С целью оценки влияния изменения климатических условий на динамику берегов о. Ушакова и о. Визе использовались данные метеорологической станции, расположенной на о. Визе (координаты: 79.48° с.ш., 76.98° в.д.): скорость и направление ветра, температура воздуха. В архиве ВНИИГМИ-МЦД ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)) ряд метеорологических данных станции начинается с 1955 года. Наиболее полные наблюдения за указанными параметрами осуществлялись с 1968 года. В связи с недостаточностью станционных данных дополнительно привлекались данные метеорологических реанализов ERA5 [1] за период с 1979 по 2019 гг. и ERA-20C [2] за период с 1952 по 2010 гг. с пространственным разрешением 0.25°. Из сеточных данных реанализов были выбраны узлы с координатами 80.75° с.ш., 79.5° в.д. для о. Ушакова и 79.25° с.ш., 77° в.д. – для о. Визе. Для компонент скорости ветра выбранное временное разрешение данных реанализов составляло 3 часа, для температуры воздуха - 6 часов. На основании срочных данных наблюдений и реанализов были рассчитаны среднесуточные значения скорости ветра и температуры воздуха. Данные реанализов были проверены по станционным наблюдениям: получено, что среднесуточная скорость ветра по данным реанализа ERA5 в среднем на 0.1 м/с выше станционных данных, а по данным реанализа ERA-20C – на 0.8 м/с меньше станционных данных. В связи с этим для получения однородного ряда скоростей ветра данные реанализа ERA-20C были увеличены на 1 м/с. Среднесуточная температура воздуха по данным реанализа ERA5 в среднем на 1.5°C выше станционных данных, а по данным реанализа ERA-20C на 0.5 °C ниже станционных данных.

Для того, чтобы оценить влияние изменения температуры воздуха на динамику берегов, были рассчитаны суммы отрицательных и положительных температур за год - индексы замерзания и таяния [3], а также количество дней со среднесуточной температурой воздуха в диапазоне -2...2°C. Для косвенной оценки влияния морского волнения на разрушение берегов использовалась информация о скорости ветра. В частности, было определено количество дней со сильным ветром (скорость больше 10 м/с) в течение года и в течение

теплого периода (периода года с положительными среднесуточными температурами воздуха). За дни со сильным ветром принимались те дни, в течение которых средняя скорость ветра за 6 часов превышала 10 м/с. Для о.Визе отдельно было рассчитано количество дней со сильным ветром при южных направлениях ветра (110-258°), поскольку такие направления являются волноопасными для южной оконечности острова.

Для о.Ушакова и о.Визе прослеживается увеличение в последние годы количества дней со сильным ветром как в целом за год, так и в теплый период года. Для района о.Визе, расположенного южнее, дней со сильными ветрами наблюдается больше.

Рассмотрена динамика годовых сумм положительных и отрицательных температур на о.Визе (рис. 1). Суммы отрицательных температур воздуха по данным реанализа ERA5 больше, а по данным реанализа ERA-20С, напротив, меньше, чем по стационарным данным. Начиная с 2005 года заметен скачкообразный переход к другому температурному режиму: суммы отрицательных температур воздуха стали меньше по модулю. Переход к другому температурному режиму, вероятно, обусловлен изменением площади морского льда в Баренцевом и Карских морях [4]. Минимальных по модулю значений сумма отрицательных температур воздуха достигла в 2012 и 2016 гг., а сумма положительных температур воздуха, напротив, в эти годы была максимальной (рис. 1б). 2012 год был годом с рекордно низкой концентрацией морского льда [5], 2016 год отмечен тем, что в начале года отмечались рекордно низкие значения площади морского льда, но к сентябрю площадь морского льда значительно увеличилась [6]. В режиме температур воздуха около нуля, в диапазоне  $-2...2^{\circ}\text{C}$ , также прослеживаются скачкообразные изменения с 2005 года. Максимальное количество дней со среднесуточной температурой около нуля наблюдалось в 2009 году (рис.1в).

В многолетней изменчивости количества дней со сильными ветрами за год не наблюдается значительных трендов для района о.Визе (рис. 2). Однако, в период года, с положительными температурами воздуха, а, следовательно, с большим потенциальным влиянием скорости ветра на разрушение берегов, количество дней со сильным ветром увеличивается. Рост количества дней со сильным ветром наблюдается как для ветров всех румбов, так и для южных румбов, волноопасных для южного побережья острова.

Также, как и для района о.Визе, в районе о.Ушакова не наблюдается значимых трендов в изменении числа дней со сильным ветром. Максимальное количество дней в течение года со сильными ветрами приходится на 2012 год. А максимум в количестве дней со сильным ветром в теплый период года наблюдалось в 2005 году (рис. 3). Отличительной особенностью ледового режима 2005 года заключается в нулевом приросте многолетнего льда к концу лета [7]. Вероятно, с этой особенностью может быть связан выявленный максимум количества дней со сильным ветром.

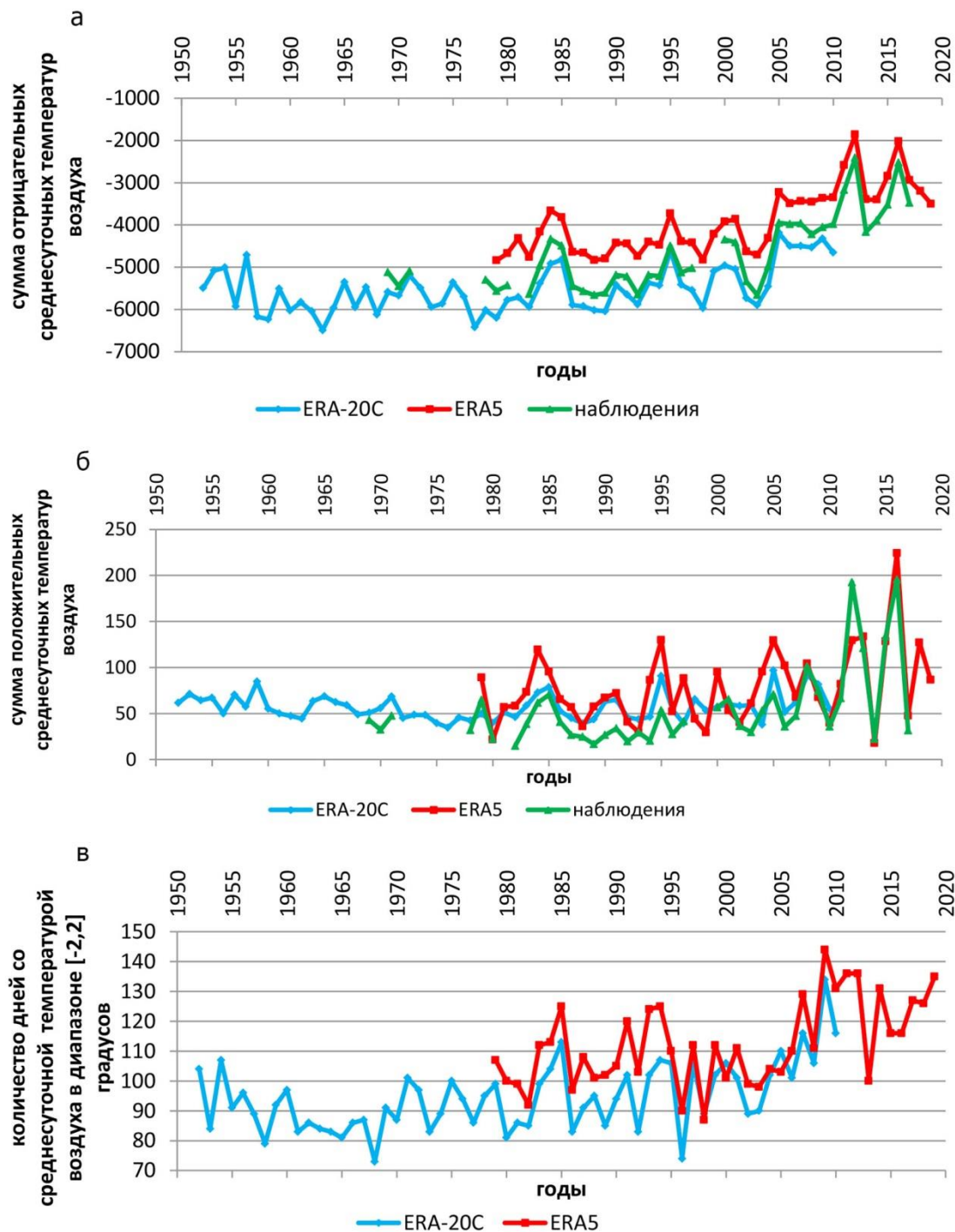


Рис.1. Многолетние изменения температуры воздуха на о.Визе по данным реанализов (ERA5 и ERA-20C) и станционных наблюдений, а – сумма отрицательных температур воздуха за год, б – сумма положительных температур воздуха за год, в – количество дней со средней суточной температурой воздуха в диапазоне -2...2°C за год.

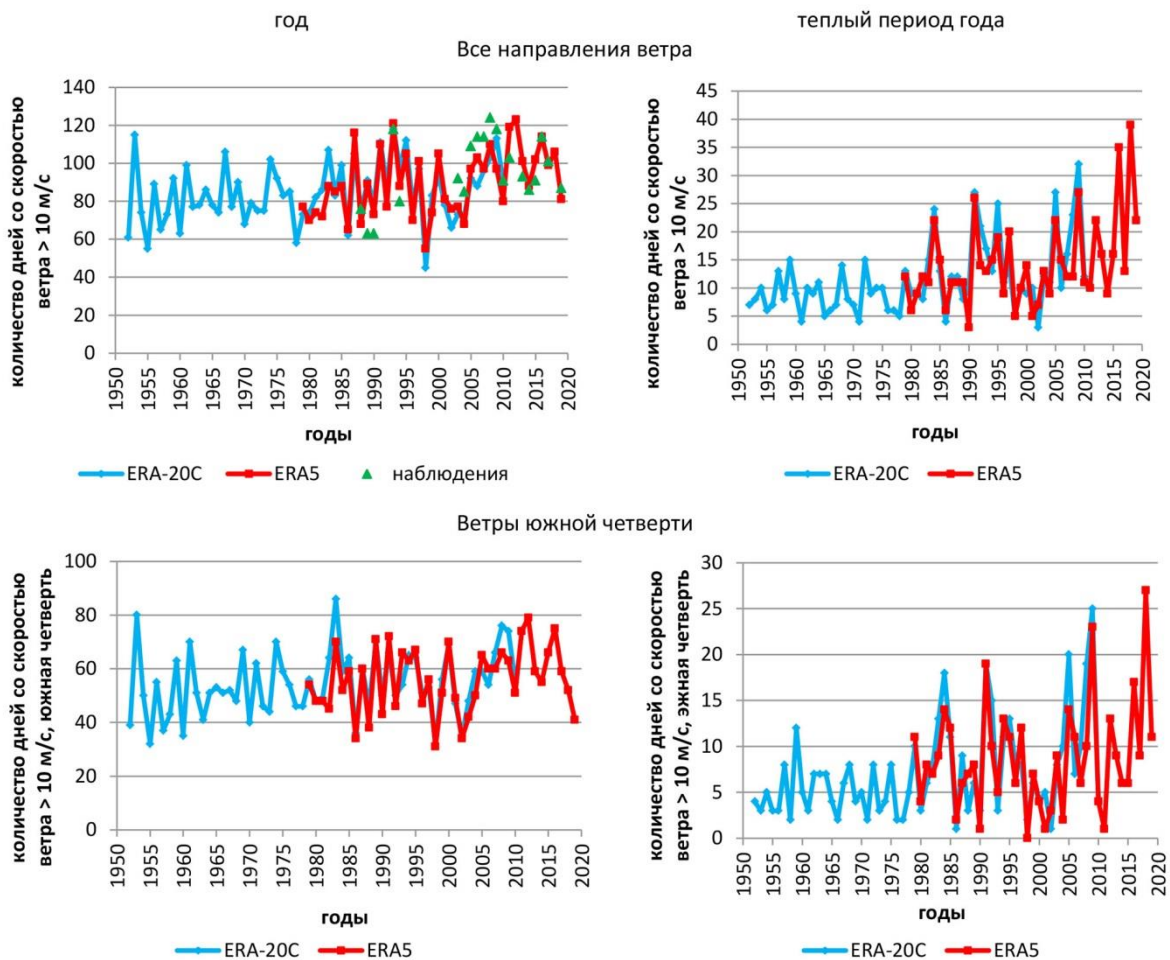


Рис.2. Количество дней со сильными скоростями ветра (больше 10 м/с) за год и в течение теплого периода для всех направлений ветра и для ветров южной четверти, о.Визе

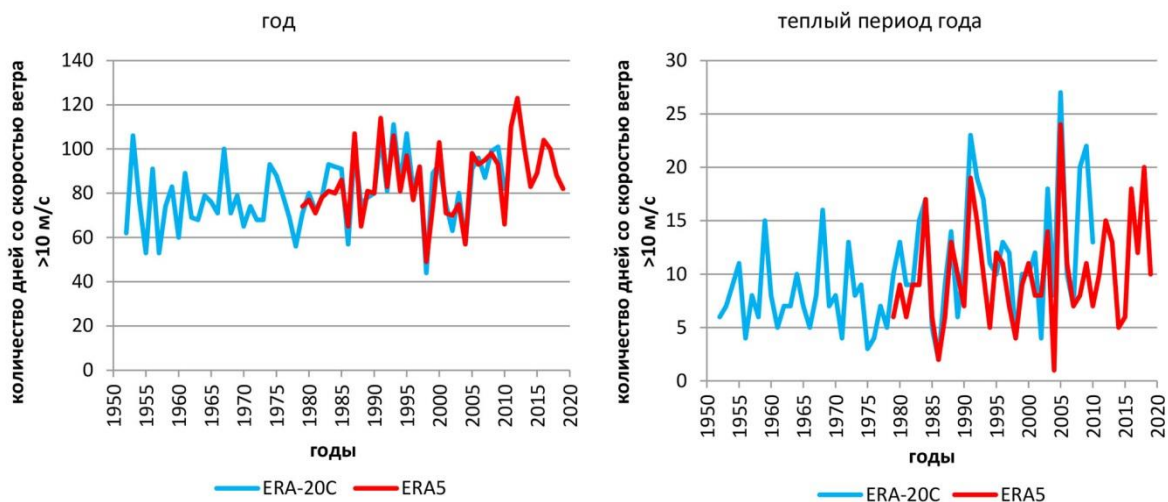


Рис.3. Количество дней со сильными скоростями ветра (больше 10 м/с) за год и в течение теплого периода, о.Ушакова

Для определения роли метеорологических факторов в многолетней береговой динамике по аналогии с работой [3], для каждого года были рассчитаны отклонения сумм положительных температур воздуха и количества дней со сильным ветром относительно среднего периода 1980-

2000 гг. (X-Хср.1980-2000 гг), которые затем были нормированы на стандартное отклонение. Период 1980-2000 гг. для расчета средних значений был выбран как относительно однородный. Такая нормировка позволяет сопоставить влияние изменений температуры и скорости ветра.

Таким образом, в последнее десятилетие воздействие термического фактора на динамику береговой линии арктических островов претерпевал значительные межгодовые изменения (рис. 4). Можно предположить, что максимальное воздействие термического фактора на береговую динамику приходится на 2012 и 2016 гг., в то время как наибольшее воздействие ветрового фактора – на 2012 г.



Рис. 4. Отклонения суммы положительных среднесуточных температур воздуха и количества дней со скоростями ветра больше 10 м/с от их среднего значения за период 1980-2000 гг., нормированные на стандартное отклонение для о.Визе и о.Ушакова.

### Список литературы

1. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Chiara, G. D., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P. de, Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S. and Thépaut, J.-N.: The ERA5 Global Reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, doi:10.1002/qj.3803
2. Poli, P., Hersbach, H., Dee, D. P., Berrisford, P., Simmons, A. J., Vitart, F., ... & Trémolet, Y. (2016). ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. *Journal of Climate*, 29(11), 4083-4097.
3. Shabanova Natalia, Ogorodov Stanislav, Shabanov Pavel and Baranskaya Alisa: Hydrometeorological forcing of western russian arctic coastal dynamics: xx-century history and current state, *Geography, Environment, Sustainability*, 11(1), 113–129, doi:10.24057/2071-9388-2018-11-1-113-129, 201
4. Semenov, V. A. and Latif, M.: Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012, *Environ. Res. Lett.*, 10(5), 054020, doi:10.1088/1748-9326/10/5/054020, 2015.

5. Parkinson, C. L. and Comiso, J. C.: On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm, *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1356–1361, doi:10.1002/grl.50349, 2013.
6. Petty, A. A., Stroeve, J. C., Holland, P. R., Boisvert, L. N., Bliss, A. C., Kimura, N. and Meier, W. N.: The Arctic sea ice cover of 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows, *The Cryosphere*, 12(2), 433–452, 2018.
7. Kwok, R.: Near zero replenishment of the Arctic multiyear sea ice cover at the end of 2005 summer, *Geophysical Research Letters*, 34(5), doi:10.1029/2006GL028737, 2007.



# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ДОСТУПА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО ЧЁРНОМУ МОРЮ

Е.В. Жук

*alenixx@gmail.com*

*Морской гидрофизический институт РАН, Россия, г. Севастополь*

*Ключевые слова. Реляционная база данных, Django, Postgresql, Mapbox GL JS, Черное море, ГИС*

## **Введение**

ГИС основывается на географической науке, предоставляя собой информационную систему для организации, управления и интеграции комплексных научных данных и знаний, а также является средой, позволяющей сделать эти знания более доступными и наглядными для ученых, планировщиков, управленцев, технических специалистов и в целом для всего общества.

В Банке океанографических данных (БОД) МГИ содержится около 160 тысяч океанографических станций, полученных в период с 1890 года по настоящее время [1]. Для хранения и организации доступа к этим данным разрабатывается информационная система на основе современных информационных и ГИС технологий с онлайн доступом [2,3,4].

## **Структура системы и используемые технологии**

Система разрабатывается на базе клиент-серверной архитектуры с использованием паттерна проектирования MVC - Model-View-Controller (Модель-Вид-Контроллер). Для реализации этого подхода был выбран свободно распространяемый фреймворк Django (версия 3) [5].

Интерфейс пользователя разрабатывается с использованием шаблонов Django, библиотеки jQuery [6], а также библиотеки Mapbox GL JS [7], которая обеспечивает работу с картографическим материалом. Обмен данными между пользовательским интерфейсом и сервером осуществляется в формате JSON [8].

Данные океанографических наблюдений хранятся в СУБД PostgreSQL [9] и представлены двумя основными составляющими: хранилище метаданных, спроектированного для интерактивной обработки транзакций (шаблон доступа OLTP), и хранилище данных наблюдений, разработанное в соответствии с архитектурой “звезда” (шаблон доступа OLAP). Структура базы океанографических данных приведена в статье [10]. Работа пользователей с системой организована в рамках web-сессий.

Структура системы представлена на рис. 1.

## **Интерфейс доступа к данным**

Пользовательский интерфейс позволяет осуществлять выборку данных по следующим критериям:



- **выборка по рейсу:** по названию рейса; названию судна; году, в который состоялся рейс. Можно выбрать как один, так и несколько рейсов (рис. 2);
- **выборка по карте:** координаты прямоугольной области задаются мышкой на карте (рис. 3);
- **выборка по временному интервалу:** ограниченный датой начала и датой окончания временной интервал и/или список месяцев (рис. 4);
- **выборка по параметрам:** из списка доступных параметров можно выбрать как один, так и несколько интересующих параметров (рис. 5).

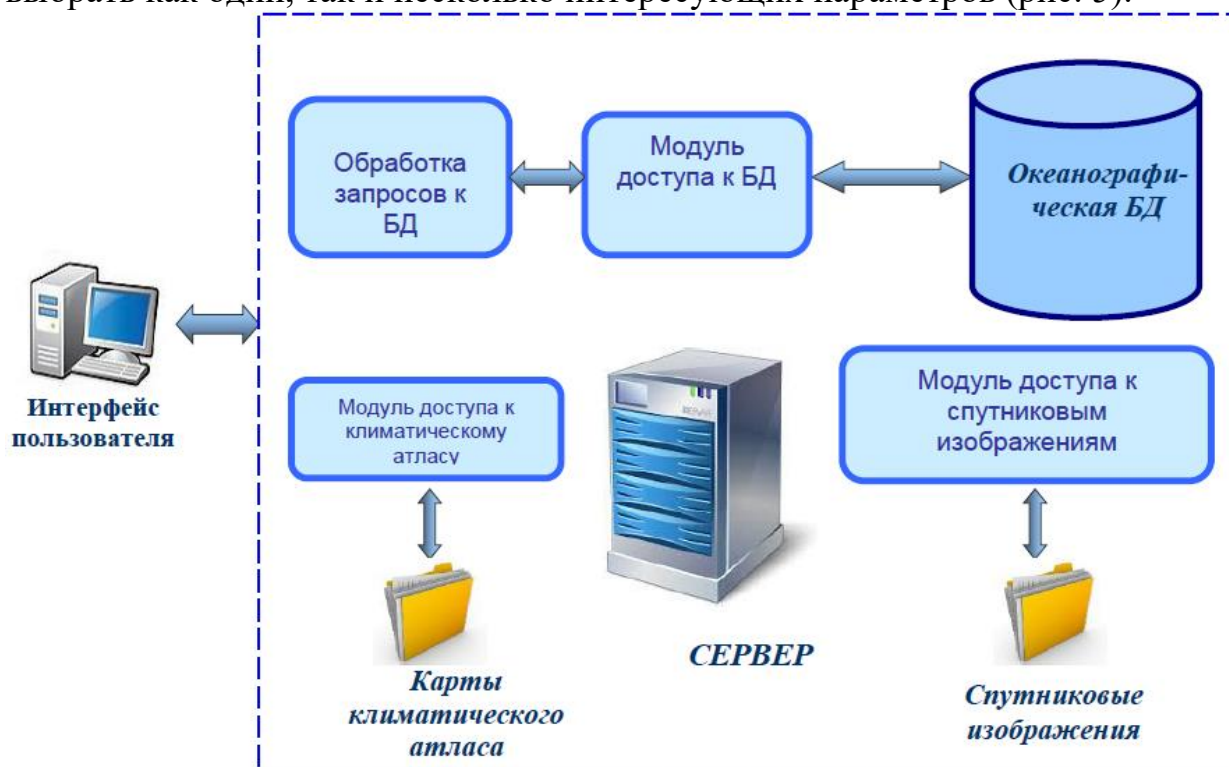


Рис. 1. Структура системы доступа к данным

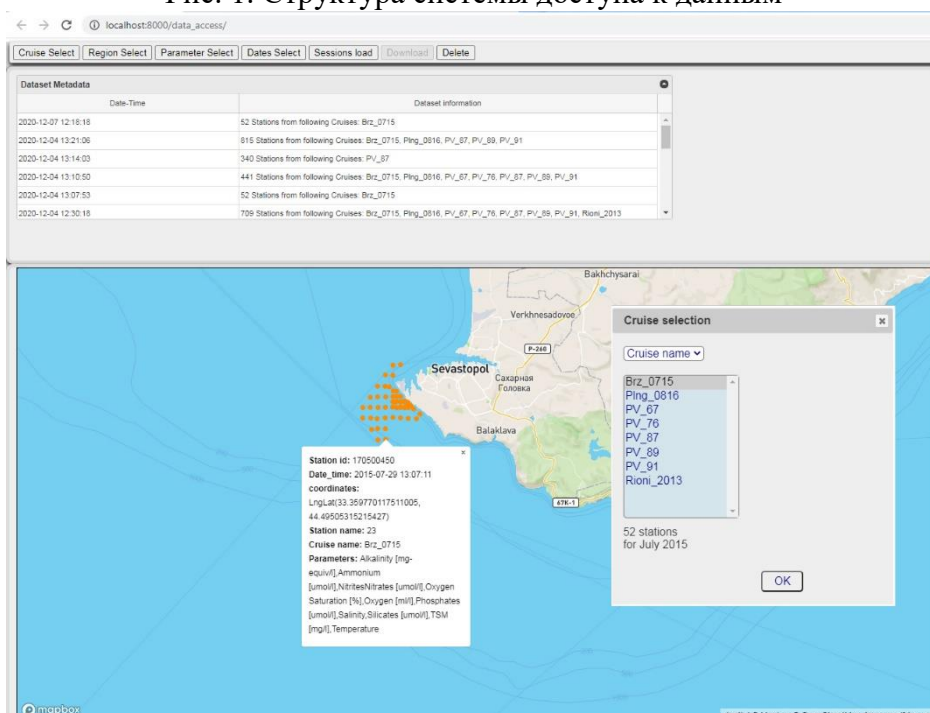


Рис. 2. Выборка по рейсу (рейс Brz\_0715)

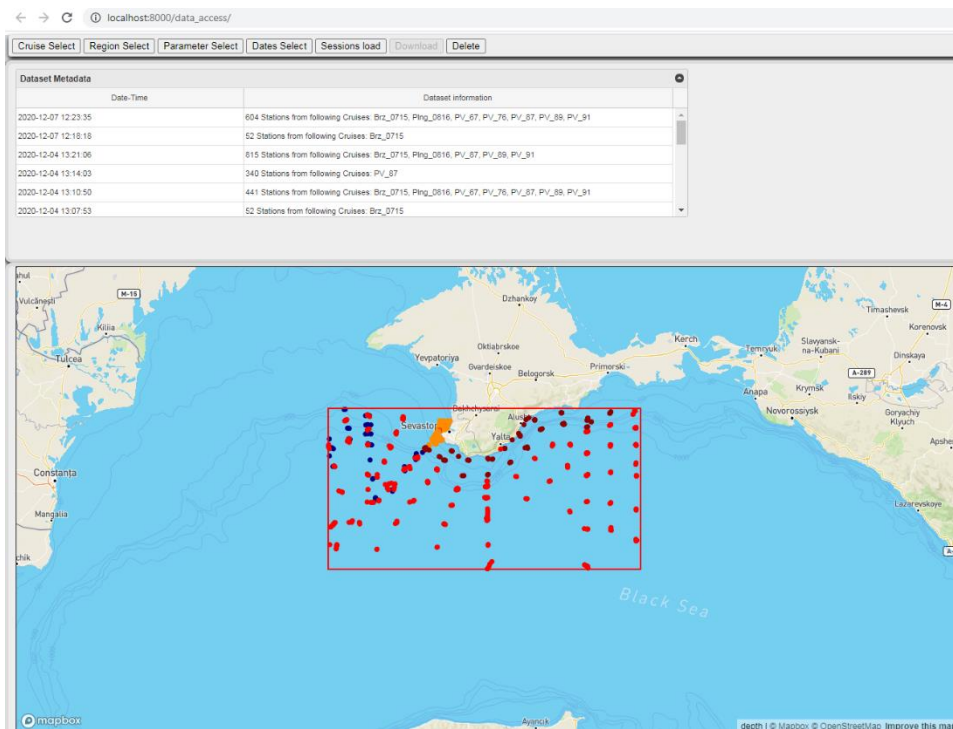


Рис. 3. Выборка по заданному региону

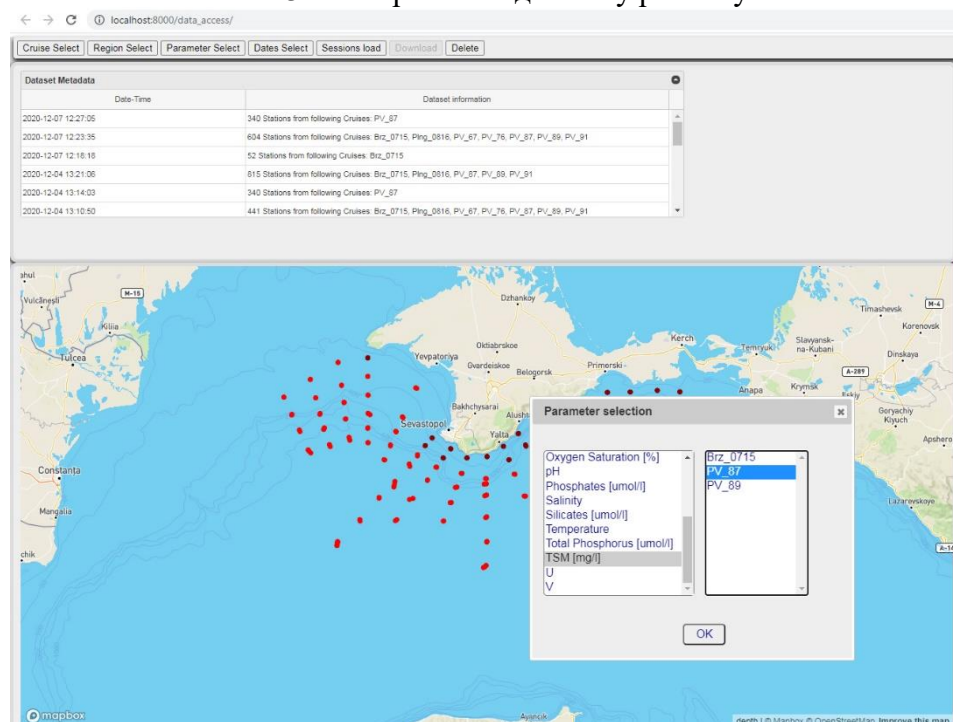


Рис. 4. Выборка по параметрам

Станции, составляющие выборку, отображаются в виде точек на карте и именованного набора данных, представленного в виде строки таблицы в верхнем окне интерфейса. Цвет станции соответствует флагам доступа:

- 0 (открытые данные) - синий
- 1 (нужно разрешение директора) - оранжевый
- 2 (нужно разрешение зав. отдела) - красный
- 3 (нужно разрешение директора и зав. отдела) – бордовый

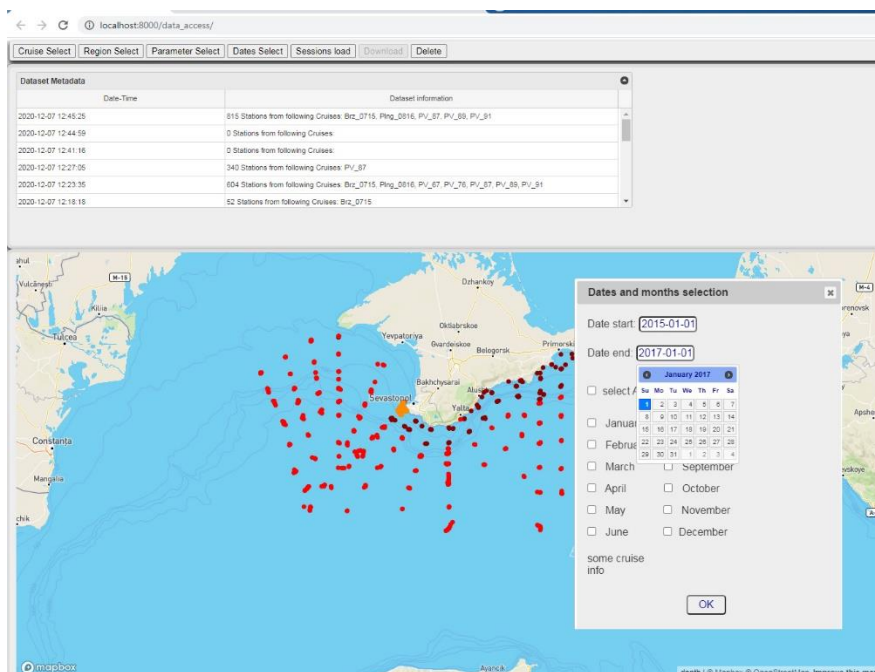


Рис. 5. Выборка для заданного временного интервала (01.01.2015 - 01.01.2017)

Для выбранных станций пользователь может посмотреть краткую информацию: номер станции, её название, координаты, название рейса, список измеренных параметров, а также их профили.

Пользователи, прошедшие авторизацию, получают возможность скачать выбранные данные, сохранить сформированные выборки и посмотреть ранее сделанные запросы.

Помимо доступа к океанографическим данным, хранящимся в реляционной базе данных, организован доступ к файловым данным, таким как Климатический атлас и Спутниковые изображения.

Модуль доступа к картам климатического атласа позволяет выбирать карты по параметрам, горизонтам, сезонам и годам. Выбранные карты отображаются в виде изолиний.

Модуль работы со снимками, полученными и обработанными сотрудниками отдела Дистанционных методов исследования МГИ с КА MODIS-Aqua, позволяет выбирать изображения за доступную дату по следующим параметрам:

- температура поверхности моря;
- концентрация хлорофилла;
- излучаемая радиация.

На рис. 6 показано совместное отображение на одной карте океанографических данных, изотерм климатического атласа поверхностного слоя за май и данных поверхностной температуры (SST) MODIS - AQUA за 16.05.2016.

### Заключение

Система доступа и визуализации данных разработанная на базе ГИС технологий позволит не только упростить процедуру получения данных для научных исследований, но и просматривать выбранные данные и сохранять ранее сделанные запросы. Так же система предоставляет доступ к

информационному продукту «Климатический атлас» и позволяет совместно отображать разнородные данные, такие как данные реляционной БД, карты климатического атласа и спутниковые наблюдения.

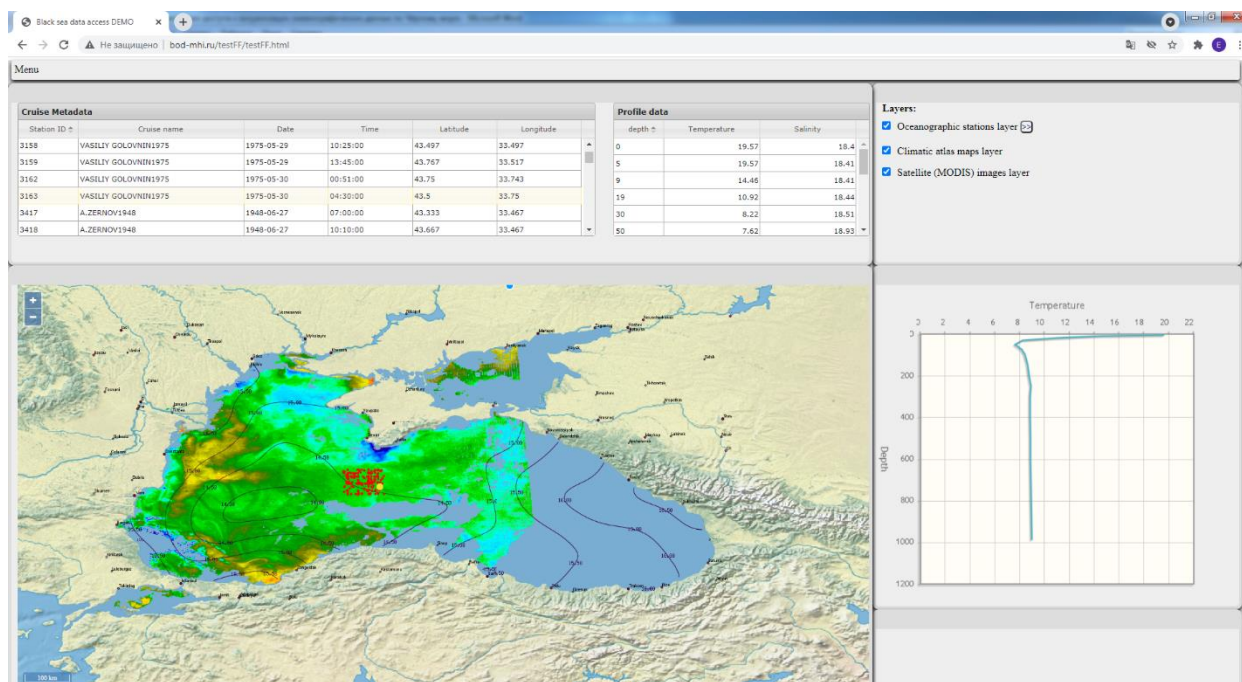


Рис. 6. Совместное отображение океанографических данных, данных климатического атласа и спутниковых изображений

*Работа ведется в рамках темы государственного задания № 0555-2021-0003 "Оперативная океанология".*

### Список литературы

1. Еремеев В.Н., Халиулин А.Х., Годин Е.А., Ингерев А.В., Белокопытов В.Н., Жук Е.В., Галковская Л.К., Исаева Е.А. Проблемно-ориентированная геоинформационная система Черного моря // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – С. 8 – 31.
2. В.Н. Еремеев, А.Х. Халиулин, А.В. Ингерев, Е.В. Жук, Е.А. Годин, Т.В. Пластун Современное состояние банка океанографических данных МГИ НАН Украины: программно-математическое обеспечение // Морской гидрофизический журнал, 2014, № 2, С. 54-66, ISSN 0233-7584.
3. Zhuk, E., A. Khaliulin, G. Zodiatis, A. Nikolaidis, E. Isaeva/ Black Sea GIS developed in MHI Proc. SPIE 9688, Fourth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2016), 96881C (August 12, 2016); doi: 10.1117/12.2241631 Volume 9688 <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=2545474>
4. А.Ю. Базыкина, Е.В. Жук, А.Х. Халиулин "Использование геоинформационной системы для отображения результатов моделирования распространения длинных волн типа цунами в прибрежной зоне Черного моря" / Морской гидрофизический журнал, 2017, №3, с
5. Django <https://www.djangoproject.com/>
6. jQuery <https://jquery.com/>
7. Mapbox GL JS <https://www.mapbox.com/mapbox-gljs>
8. JSON <https://www.json.org/json-en.html>
9. Postgresql <https://www.postgresql.org/>
10. Elena Zhuk, "The Black Sea oceanographic web GIS interface new developments," Proc. SPIE 11524, Eighth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2020), 1152413 (26 August 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2570979>



# ВЛИЯНИЕ ТИПОВ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА СПЕКТР АНТРОПОГЕННЫХ ТРАНСФОРМАЦИЙ РЕЛЬЕФА (НА ПРИМЕРЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ)

Г.А. Кажукало, Е.А. Еременко

*bec.tolkoviy@yandex.ru; eremenkoeaig@gmail.com*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,*

*географический факультет, Россия, г. Москва*

История природопользования на территории Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) насчитывает несколько тысяч лет, однако на ранних этапах воздействие антропогенной деятельности на ландшафты и рельеф было незначительным (ведущим типом природопользования было фоновое традиционное – оленеводство, охота, рыболовство и др.). В XVIII-XIX вв. на территории АЗРФ возникли первые очаги комплексного освоения (селитебного, промышленного), сосредоточены они были в Европейской части России. Наиболее интенсивная и широкомасштабная индустриализация арктических территорий, сопряженная с различными антропогенными трансформациями рельефа, началась лишь в XX-м столетии [1, с. 43]. Несмотря на сравнительно непродолжительную историю освоения, высокий минерально-сырьевой потенциал Арктики обуславливает постоянно возрастающую антропогенную нагрузку на экосистемы. Более того, в ходе последнего десятилетия Арктические территории стали важнейшим объектом социально-экономической переориентации России [2, с. 5]. Разномасштабные оценки динамики антропогенных трансформаций на территории АЗРФ подтверждают увеличение площади антропогенно-преобразованных ландшафтов [3, с. 46]. Интенсификация антропогенного освоения обуславливает необходимость изучения воздействия деятельности человека на различные компоненты окружающей среды, в том числе и на рельеф и рельефообразующие процессы.

*Антропогенные трансформации рельефа* – это совокупность процессов воздействия хозяйственной деятельности на рельеф территории и рельефообразующие процессы. Антропогенные трансформации можно разделить на прямые и косвенные. *Прямые* трансформации рельефа – это создание, уничтожение или изменение естественного рельефа, *косвенные* связаны с воздействием на условия и факторы рельефообразования, приводящим к изменению интенсивности и спектра присущих процессов рельефообразования. В результате прямых антропогенных трансформаций формируется *антропогенный рельеф* - совокупность форм земной поверхности, измененных или созданных деятельностью человека [4, с. 29]. Антропогенные формы рельефа возникают при инженерно-строительных работах, гидротехническом строительстве, сельскохозяйственных работах и военных мероприятиях. Поскольку масштабы и морфология антропогенных форм рельефа, спектр преобладающих косвенных трансформаций зависит от применяющихся инженерно-технических способов освоения [1, с. 43], целесообразно рассматривать антропогенные трансформации рельефа в

пределах АЗРФ путём разделения по *ведущему типу природопользования*, в рамках которого они протекают.

На основе анализа опубликованной научной литературы, результатов дешифрирования космических снимков и изучения морфологии антропогенных форм рельефа в среде ГИС выделено семь ведущих типов природопользования в Арктике: *традиционный, сельскохозяйственный, лесохозяйственный, милитаригенный, транспортный, селитебный и промышленный*. Каждый из выделенных типов характеризуется специфичным комплексом создаваемого антропогенного рельефа и присущим спектром косвенных трансформаций (табл. 1).

Таблица 1

Прямые и косвенные трансформации рельефа, присущие разным типам природопользования в Арктике

Тип природопользования	Локализация	Прямые трансформации (характерные антропогенные формы)	Косвенные трансформации (воздействие на рельефообразующие процессы)
Традиционное и сельскохозяйственное	Фоновая площадная	Выемки оросительных и дренажно-сбросных каналов, разъёмные борозды, микрорельеф оленьих троп	Активизация термокарста, термоэрозии, плоскостного смыва, дефляции и заболачивания
Лесохозяйственное	Очаговая площадная	Опилочные псевдотеррасы и отвалы	В зоне вырубки – активизация плоскостного смыва, линейной эрозии, термокарста и термоэрозии, дефлюкции, заболачивания. В зоне переработки – перегнивание и просадочные деформации антропогенных отложений (опилок и отходов)
Милитаригенное	Линейная, линейно-площадная и площадная очаговая	Оборонительные валы, насыпи укрепрайонов, траншеи, рвы, окопы, землянки, взрывные воронки, формы субрельефа (тоннели и др.)	Активизация делювиального смыва, дефляции, склоновых процессов, заболачивания и подтопления

Транспортное	Линейная и линейно-площадная очаговая	Авто- и железнодорожные насыпи, выемки, кавальеры, канавы, кюветы, траншеи и валики обратной засыпки трубопроводов	Активизация морозного выветривания, термоэрозии, термокарста, пучения, наледеобразования, новообразование таликов, криогенные сплывы, солифлюкция на откосах, также линейная эрозия, суффозия, заболачивание; в береговой зоне – термоабразия
Селитебное	Крупноочаговая площадная	Насыпи, выемки, искусственные террасы; субрельеф подземных сетей (тоннели, полувыемки), <i>рельефоиды</i>	Активизация эрозионных процессов (в верхних звеньях флювиальной сети), суффозии, дефляции, наледеобразования, склоновых процессов (особенно оползневых), просадочных деформаций
Промышленное	Крупноочаговая площадная, линейно-площадная (для россыпных месторождений)	Карьеры, насыпи, отвалы, терриконы, насыпи хвостохранилищ, золоотвалы, формы субрельефа – стволы и штольни шахт и скважин	Активизация склоновых (обвальноподолзневых и оползневых) процессов, дефляции, заболачивания суффозии, эрозионных и аккумулятивных процессов в руслах рек и ручьев, проявление пиролиза (самовозгорание отвалов), просадочные деформации и возбужденные землетрясения

Наибольшего масштаба и интенсивности антропогенный морфогенез достигает на участках промышленного, транспортного и селитебного природопользования. На участках промышленного природопользования антропогенные формы занимают большие пространства в сравнении и площадью участков косвенного воздействия хозяйственной деятельности на рельеф. Для этого типа природопользования также характерны наибольшие объемы антропогенных форм. Селитебное природопользование отличает преобладание аккумулятивных форм антропогенного рельефа над

денудационными (по площади и объему). Для промышленного и милитаризованного типов природопользования примечательно широкое распространение форм субрельефа, для селитебного – плотное скопление рельефоидов. Лесохозяйственное, традиционное, сельскохозяйственное типы, в свою очередь, характеризуются преобладанием косвенных трансформаций рельефа.

Антропогенный рельеф участков промышленного освоения характеризуется наиболее сложной морфологией. В ходе эксплуатации месторождений и последующей переработки сырья наблюдается наиболее существенное воздействие на компоненты географической оболочки. Для количественной оценки масштабов прямых и косвенных антропогенных трансформаций исследован Норильский рудный район, в пределах которого расположен г. Норильск и месторождение «Норильск-1», включающее в себя рудник «Заполярный» и карьер «Медвежий ручей». Общая площадь исследуемого участка составляет 140 км<sup>2</sup>. В ходе оценки прямых антропогенных трансформаций и идентификации антропогенных форм рельефа была использована цифровая модель рельефа ключевого участка с пространственным разрешением 2 м, полученная с помощью ArcticDEM [5]. В среде ГИС определены площади и объёмы антропогенных форм, составлена среднемасштабная (1:200 000) картосхема антропогенного рельефа (рис. 1).

Общая площадь территорий, подверженных прямой трансформации рельефа, составляет 41 км<sup>2</sup>. Наибольшее распространение имеют аккумулятивные формы рельефа – насыпи под селитебной и промышленной застройкой мощностью в среднем 2-3 м, насыпи хвостохранилищ высотой до 50 м, не выраженные в масштабе составленной карты насыпи автодорог и железнодорожных путей. В южной части исследуемой территории располагаются фэстончатые в плане крупнейшие отвальные поля рудника «Заполярный» (крутизна их склонов достигает 45-50°, а высота – от 10 до 30 метров). Среди денудационных антропогенных форм выражены изометричные в плане карьеры и карьеры-прорези рудника «Заполярный», в том числе и крупнейший карьер «Медвежий ручей», глубина которого достигает 310 м, ширина в поперечнике – 1200 м. Так как добыча в пределах месторождения ведётся и закрытым способом, на территории рудника примечательны и формы субрельефа – глубина стволов шахт «Заполярного» достигает 230 м. Доля аккумулятивных форм в общей площади антропогенного рельефа составляет 90,7% по площади и 82% по объёму. При этом существенную площадь занимают насыпи под отдельными рельефоидами (и их комплексами) селитебного и горно-обогатительного назначения (34,5 %).

Складирование отходов в виде отвальных полей и хвостохранилищ сопровождается изменением *литологического состава приповерхностных пород*, крутизны поверхности и практически полным *сведением растительности*, что приводит к активизации склоновых процессов (в первую очередь обвально-осыпных на отвалах и склонах карьеров), суффозии, линейной эрозии и плоскостного смыва, наблюдаются интенсивные



горизонтальные русловые деформации и увеличение стока наносов прилегающих водотоков. На поверхности насыпей хвостохранилищ также отмечена активизация дефляции [6]. Хозяйственная деятельность оказывает существенное воздействие на *теплофизические свойства* многолетнемерзлых пород, приводя к их растеплению, активизации термокарста и термоэрозии, суффозии, образованию техногенных таликов.

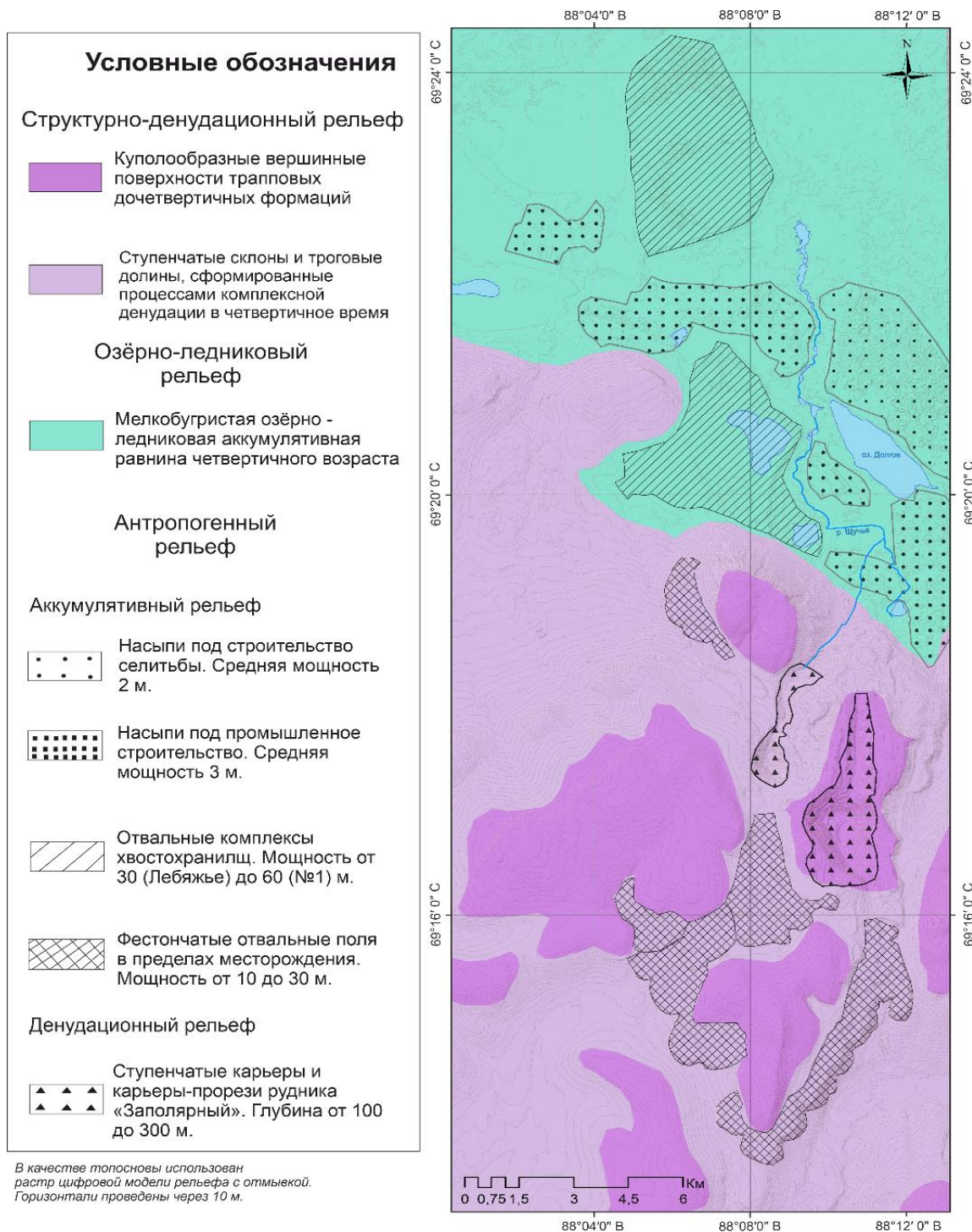


Рис. 1. Антропогенный рельеф Норильского рудного района

Ввиду характерных для исследуемой территории метеорологических явлений, таких как застои и инверсии приземных воздушных масс, примечательны *косвенные климатические трансформации*, выраженные в

изменении химического состава и характера выпадения осадков. В результате частых кислотных дождей ливневого характера растительность в радиусе нескольких километров от обогатительной фабрики представлена исключительно вторичными сообществами, древесная растительность и вовсе отсутствует [7]. Воздействие на рельефообразующие процессы описанных метеоявлений выражается в виде активизации делювиального смыва, линейной и плоскостной эрозии.

Необходимость утилизации кислотных вод приводит к широкому развитию *косвенных гидрологических трансформаций*. В процессе эксплуатации трубопроводов было отмечено множество климатически- и антропогенно-обусловленных аварий, в ходе которых на обширных территориях водные объекты и почвы подвергаются химическому загрязнению (рис. 2). Подобные аварии сопровождаются утечкой рудничных вод, их стоком в прилегающие водотоки по локальным понижениям, приводит к активизации линейной эрозии, подтопления и заболачивания, развитию форм рельефа временных водотоков (рис. 2).

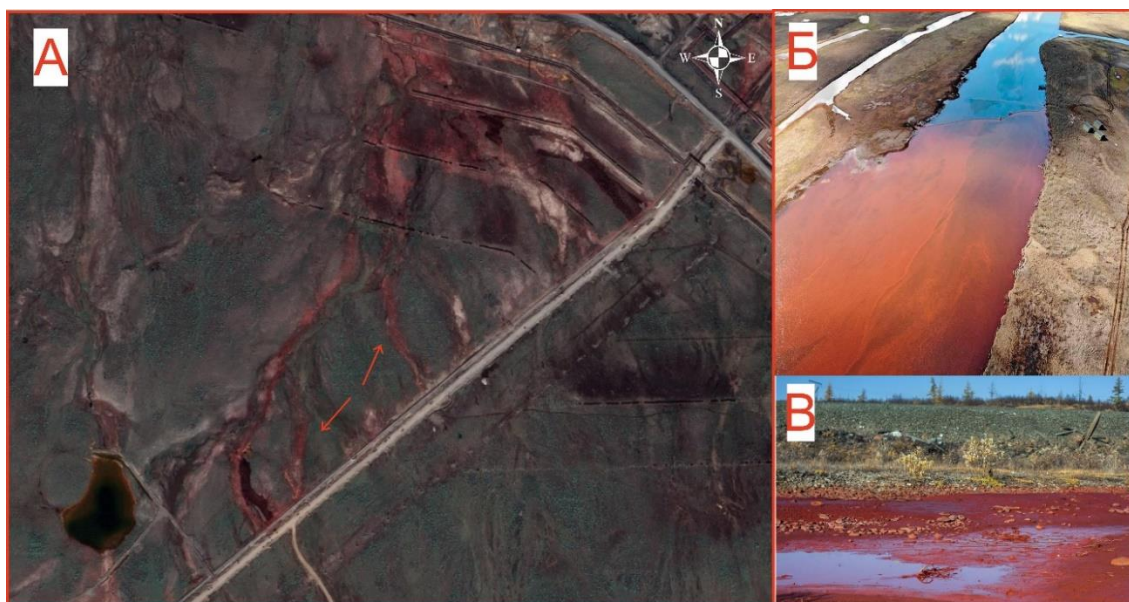


Рис. 2. Последствия аварии на трубопроводе между обогатительной фабрикой и хвостохранилищем, стрелками показаны эрозионные рытвины, образованные рудничными водами [8], Б – авария 2020 года на реке Амбарная [9], В – авария 2016 года на р. Далдыкан [10]

## Выводы

1. Наибольшими масштабами антропогенное рельефообразование характеризуется на участках промышленного, транспортного, милитаригенного и селитебного типов природопользования. Лесохозяйственное, традиционное и сельскохозяйственное типы, в свою очередь, характеризуются преобладанием косвенных трансформаций рельефа.

2. Полученная оценка масштабов антропогенной трансформации рельефа на территории Норильского рудного района подчёркивает, что на участках промышленного природопользования преобладают прямые

трансформации рельефа, причём по площади и объёму преобладают аккумулятивные антропогенные формы.

3. В ходе промышленного типа природопользования, а именно эксплуатации месторождений и последующем обогащении руды, наблюдается широкий спектр косвенного воздействия на растительный покров, литологические, климатические и гидрологические условия и факторы рельефообразования. Интенсивное воздействие на температурный режим вечномёрзлых пород и выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, вкупе с изменчивостью климата Арктических областей, могут стать причиной масштабных техногенных катастроф.

### Список литературы

1. Бредихин А.В., Еременко Е.А., Харченко С.В., Беляев Ю.Р., Романенко Ф.А., Большов С.И., Фузеина Ю.Н. Районирование Российской Арктики по типам антропогенного освоения и сопутствующей трансформации рельефа на основе кластерного анализа // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. С. 42-56.
2. Пилясов А.Н. Российский арктический фронт: парадоксы развития // Регион: экономика и социология, 2015. №3. С. 3 - 36.
3. Тишков А.А., Белоновская Е.А., Глазов П.М., Кренке А.Н., Титова С.В., Царевская Н.Г., Шматова А.Г. Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки // Арктика: экология и экономика, 2019. №4. С. 38 – 51.
4. Щукин И.С. Четырёхязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии / Под ред. Спиридонова А.И. М.: Сов. энциклопедия, 1980. – 703 с.
5. [Электронный ресурс]. ArcticDEM. URL.: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>
6. Бутюгин В.В., Гулан Е.А. Геодинамическая и геоэкологическая безопасность хвостохранилищ в Норильском промышленном районе // ГИАБ. 2005. №1. С. 122 – 126.
7. Телятников М.Ю., Пристяжнюк С.А. Антропогенное влияние предприятий Норильского промышленного района на растительный покров тундры и лесотундры // Сибирский экологический журнал, 2014. №6. С. 903 – 922.
8. [Электронный ресурс]. Google Earth. URL.: <https://earth.google.com/>.
9. [Электронный ресурс]. Arctic declares state of emergency after thousands of tons of diesel leak into river. URL.: <https://nypost.com/2020/06/02/arctic-declares-state-of-emergency-after-thousands-of-tons-of-diesel-leak-into-river/>
10. [Электронный ресурс]. Russian river's water turns red after metal smelter discharge, company says. URL.: <https://www.chicagotribune.com/nation-world/ct-russia-river-pollution-20160913-story.html>.

# ИССЛЕДОВАНИЕ РОТОРНЫХ ЗОН ПРИ ОБТЕКАНИИ ГОР СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

<sup>1</sup>В.Н. Кожевников, <sup>2</sup>М.К. Беданок, <sup>2</sup>Р.Б. Берзегова

*kozhvni@mail.ru; bedan64@mail.ru; rozaberzegova@yandex.ru*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Россия, г. Москва

<sup>2</sup>Майкопский государственный технологический университет,  
Россия, г. Майкоп

**Аннотация.** В работе продолжают исследования возмущений воздушного потока при обтекании участка Главного Кавказского хребта, находящегося в пределах Республики Адыгея (г. Фишт) на основе применения нелинейной аналитической двумерной модели. Вертикальная неограниченность атмосферы учитывается в трехслойном представлении, характерные особенности формы рельефа учитываются точно, кинематика и динамика взаимодействия потоков в разных слоях – приближенно. Обсуждаются условия появления роторов в потоке и степень их устойчивости при наличии стратификации. Приводятся для сравнения результаты, полученные авторами при исследовании роторных циркуляций при обтекании Маркхотского хребта в районе города Новороссийска.

**Ключевые слова.** Физика атмосферы, гидродинамика, моделирование, обтекание гор, волновой масштаб Лира, роторы.

## Введение

Данная работа продолжает исследования возмущений, возникающих в атмосфере при обтекании гор реальной формы на основе аналитического моделирования. Применяется нелинейная стационарная двумерная мезомасштабная открытая модель: возмущения скорости учитываются без упрощений, силы Кориолиса не учитываются, вертикальная неограниченность атмосферы учитывается в трехслойном варианте, в котором нижний слой представляет тропосферу, а два остальных – влияние верхней атмосферы [1-4]. Правомерность такого подхода подтверждена работами [1-4]. Целью работы является исследование не только общих свойств возмущений, но и условий появления роторов в потоке и степень их устойчивости при наличии стратификации. При этом учитывается опыт применения модели для других горных районов [5-7].

## Теоретическая модель

Моделирование явления обтекания гор осуществлялось на основе решения уравнения Гельмгольца для возмущений функции тока

$$\nabla^2 \psi'(x, z) + \chi^2 \psi' = 0, \quad \psi = -Uz + \psi', \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (1)$$

Для получения (1) рассматривается общеизвестная система исходных нелинейных уравнений движений, адиабатичности и неразрывности в упрощениях Буссинеска для стационарного случая и без учета сил вязкости и Кориолиса. Получение из этой системы одного линейного уравнения (1)



осуществляется посредством использования известного преобразования [8], при котором не предполагается малость возмущений скорости, но рассматривается частный вариант свойств натекающего потока, а именно случай, когда выполняется

$$U = const, \quad \gamma = const. \quad (2)$$

Основные возмущения при этом определяются соотношениями:

$$u = -\frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad T' = -\frac{(\gamma_a - \gamma)\psi'}{U}. \quad (3)$$

где  $\psi$  - функция тока,  $\psi'$  - возмущение функции тока,  $U$  - скорость натекающего потока,  $x, z$  - горизонтальная и вертикальная координаты в рассматриваемой вертикальной плоскости,  $\gamma, \gamma_a$  - вертикальный и сухоадиабатический градиенты температуры,  $u, w$  - горизонтальная и вертикальная компоненты скорости,  $T'$  - возмущения температуры.

В работе использовался трехслойный вариант модели: нижний слой в ней представляет тропосферу, а два верхних введены для приближенного учета влияния верхних слоев атмосферы, при этом второй снизу представляет часть нижней стратосферы, а верхний неограничен по высоте. Слои отличались только устойчивостью. Решение такой задачи сводилось к решению одного и того же уравнения (1), но в каждом из слоев коэффициент этого уравнения разный и определяется соотношениями

$$\chi_j = \frac{N_j}{U} = \frac{2\pi}{\lambda_j}, \quad \lambda_j = 2\pi \frac{U}{N_j}, \quad N_j^2 = g \frac{\gamma_a - \gamma_j}{T_{1j}}, \quad (4)$$

где  $N_j$  - частоты Брента-Вяйсяля в натекающем потоке перед горами,  $\lambda_c$  - волновой масштаб Лира [9],  $T_{1j}$  - характерная (средняя) температура слоя,  $j = 1, 2, 3$  - индекс слоя снизу вверх.

При этом поверхность Земли задается посредством равенства:

$$z = z_* + \xi, \quad z_* = const, \quad \xi \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad |x| \rightarrow \infty, \quad (5)$$

и предполагается, что относительное возмущение рельефа невелико:  $|\xi| < z_*$ . На этой поверхности граничное условие скольжения с учетом (5) используется в виде:

$$\psi_1(x, z_* + \xi(x)) = -Uz_*, \quad \psi'_1(x, z_* + \xi(x)) = U\xi(x). \quad (6)$$

Данную модель можно проиллюстрировать схематически с помощью рис. 1. На нём представлена картина обтекания воздушным потоком гор, расположенных в окрестности начала координат. Высоты поверхностей раздела выражаются аналогично (5):

$$z = z_* + H_j + \xi_j, \quad |\xi_j| \rightarrow 0, \quad \text{при} \quad x \rightarrow -\infty, \quad j = 1, 2, \quad (7)$$

где  $H_j$  и  $\xi_j$  - высота в натекающем потоке и смещение в зоне возмущений поверхностей раздела. При этом необходимо требовать выполнение условия непрерывности поля  $\psi$  и поля давления при переходе из одного слоя в другой, что обеспечивается выполнением соотношений:

$$\psi'_j = \psi'_{j+1}, \quad \frac{\partial \psi'_j}{\partial z} = \frac{\partial \psi'_{j+1}}{\partial z}. \quad (7)$$

В качестве первого приближения решение строится при использовании (7) на фиксированных фоновых уровнях высоты.

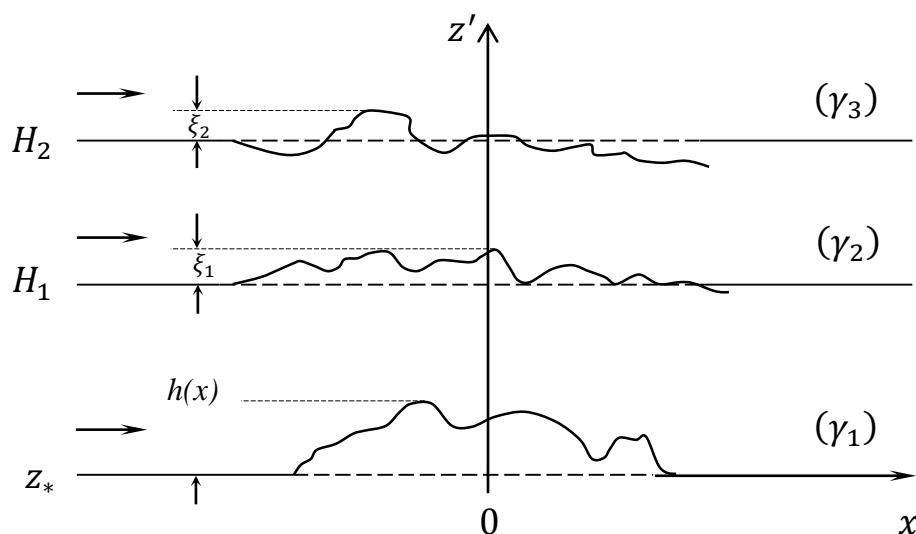


Рис. 1. Схематическое представление параметров модели,  $z' = z - z_*$ .

### Возмущения поля траекторий и роторы

В настоящей работе мы продолжаем исследование возмущений воздушного потока при обтекании участка Главного Кавказского хребта, находящегося в пределах Республики Адыгея (г. Фишт) [2]. На основе цифровой модели рельефа по методике, описанной в работах [1,2,10] рассчитывался искомый двумерный рельеф. Для анализа обтекания воздушным потоком горы Фишт рассматривалось 5 модельных сценариев (табл. 1). Значения скорости ветра  $U$  в натекающем потоке однозначно определялись величиной  $\lambda_j$ .

Таблица 1

Параметры представленных модельных сценариев

Модельный расчет	$U$ , м/с	$\gamma_1$ , град/км	$\gamma_2$ , град/км	$\gamma_3$ , град/км	$\lambda_1$ , км	г. Фишт		Маркхотский хребет (г. Сахарная голова)	
						$\zeta$	р/в	$\zeta$	р/в
I	8	6	0	3	4.0007	2.79	Р	0.86	Р
II	10	6	0	3	5.0009	2.23	В	0.68	Р
III	15	6	0	3	7.5013	1.49	В	0.46	б/р
IV	19	6	0	3	9.5016	1.17	В	0.36	б/р
V	22	6	0	3	11.0019	1.01	б/р	0.28	б/р

Высоты поверхностей раздела задавались равными 10 и 18 км, благодаря чему обеспечивалась сходимость используемых интегралов. Расчеты проводились до высот 30 км. Шаги расчетной сетки при вычислении поля

траекторий составляли по  $x$  и  $z$  соответственно 50 и 250 м, что обеспечивало высокое качество пространственного разрешения.

Анализ картин обтекания рельефа воздушным потоком показал, что возмущения становятся особенно сильными, когда в потоке появляются роторы в понимании [11], т.е. возмущения, при которых частицы воздуха двигаются либо вертикально, либо навстречу основному потоку. На рис. 2 и 3 показаны картины обтекания при  $U = 15$  и 22 м/с. При  $U = 15$  м/с возмущения наиболее интенсивны над гребнями хребтов, где они характеризуются наличием зоны с роторами или «роторными зонами» и протяженными участками вертикальных движений. Подветренно-волновые возмущения достаточно интенсивны только ниже и выше этой зоны. Ядро роторной зоны, где особенно велики возмущения, располагается в области, похожей на прямоугольник. Общая протяженность роторной зоны по ветру больше протяженности ее ядра и достаточно близка по величине и протяженности

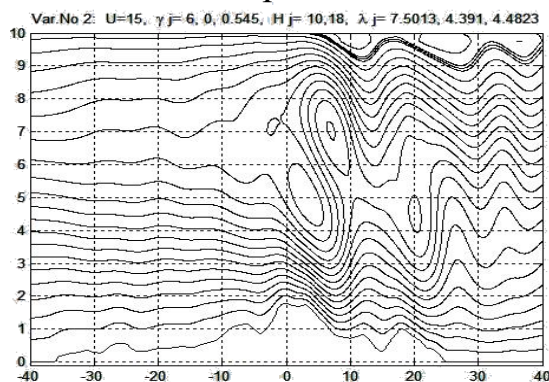


Рис. 2. Картина обтекания горы Фишт для модельного сценария III (табл. 1)

подветренной части рельефа (от главной вершины вниз по ветру). Область максимальных амплитуд располагается в наветренной части роторной зоны. Указанные амплитуды в несколько раз превышают максимальную высоту гор. Этот феномен может зависеть одновременно от величины масштаба Лира, формы и высоты гор.

Наличие столь заметных возмущений позволяет предположить, что часть роторных возмущений, полученных в расчетах, в природе может преобразоваться в зоны турбулентности высокой интенсивности.

Увеличение скорости до значения  $U = 22$  м/с сопровождается резкой трансформацией характера роторной зоны (рис. 3). Замкнутые вихри исчезают, нет области чисто вертикального и тем более возвратного движения. Течение над горой сгладилось сильно, а роторная зона вовсе исчезла.

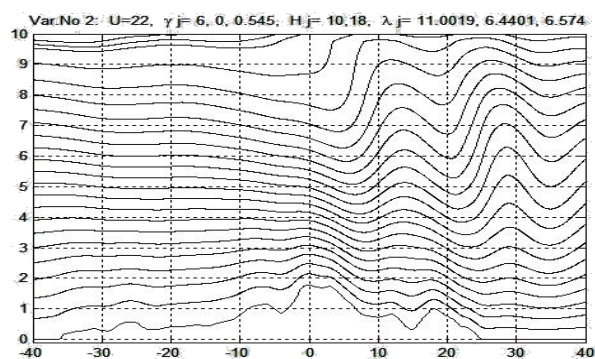


Рис. 3. Картина обтекания горы Фишт для модельного сценария V (табл. 1)

Было замечено, что повышение интенсивности возмущений сопровождалось сначала появлением областей возвратного течения, а потом – полностью замкнутых вихрей. Такие вихри были в трех из указанных

вариантов расчета: в одном роторы были в самой начальной стадии развития, и еще в одном – роторы отсутствовали. Наличие таких стадий развития возмущений отражается в последней колонке табл. 1: В – наличие вихрей, Р – наличие роторов, б/р – без роторов.

В таблице также указаны значения параметра  $\zeta$ , выступающего одной из количественных характеристик процесса перехода возмущений к роторному течению. В работе [12] этот параметр называется безразмерной высотой горы и определяется величиной обратной внутреннему числу Фруда, в котором в качестве масштаба используется максимальная высота горы  $h_m$ :

$$\zeta = F_i^{-1} = \frac{Nh_m}{U} = 2\pi \frac{h_m}{\lambda_c}. \quad (8)$$

Анализ картин траекторий обтекания рельефа во всем рассматриваемом диапазоне значений масштаба Лира (таблица 1), показал, что роторы над г.Фишт наблюдаются при  $\lambda_c = 4, 5, 7.5, 9.5$  км, т.е. при значениях  $\xi \geq 1,17$ . При  $\lambda_c > 9.5$  км роторы отсутствуют.

В работе [4] были проведены исследования возмущения поля траекторий при обтекании Маркхотского хребта, наивысшая точка которого в районе города Новороссийска – гора Сахарная голова (548 м) для широкого диапазона значений масштаба Лира: от 3 до 11 км. На рис. 4-6 представлены картины обтекания при скоростях натекающего потока  $U = 10$  м/с и 15 м/с. Анализ всех полученных траекторий показал полное отсутствие вихрей и лишь при некоторых скоростях  $U$  были зафиксированы роторы. В табл. 1 с целью сравнения с результатами при обтекании г. Фишт отражены лишь часть результатов.

К типичной для атмосферы картине возмущений ближе всего вариант  $\lambda_c = 3$  км. В работе представлены варианты  $\lambda_c = 4$  и  $\lambda_c = 5$  км так же близкие к типичным.

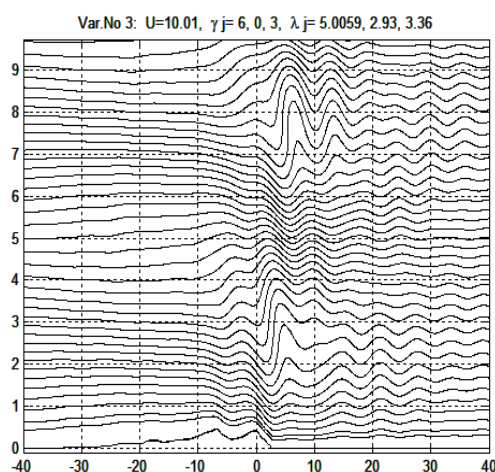


Рис. 4. Картина обтекания Маркхотского хребта для модельного сценария II (табл. 1)

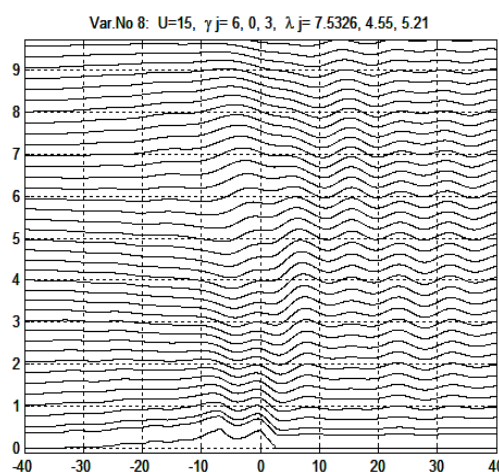


Рис. 5. Картина обтекания горы Маркхотского хребта для модельного сценария III (табл. 1)



При  $\lambda_c=3$  км роторы наблюдались над подветренными склонами обоих хребтов и периодически повторялись на всех рассмотренных высотах, то есть до 30 км (в этом случае безразмерная высота  $\zeta=1.14$ ). Роторы наблюдались и при  $\lambda_c=4$  км (табл.1), но они видны были над подветренным склоном второго хребта, периодически повторяясь до 30 км. При  $\lambda_c=5$  км (рис. 4) роторы были видны только в области за последним по потоку хребтом и не в первом диапазоне высот, а - во втором. Сравнение представленных полей траекторий показало, насколько существенно ослабляются возмущения при увеличении  $\lambda_c$  или уменьшении  $\zeta$ . При значениях  $\lambda_c > 5$  роторы отсутствовали (рис. 5). Таким образом, роторы наблюдались при  $\xi \geq 0,69$ .

Ранее для горы-полукруга высотой 1 км, было получено, что критическое значение  $\zeta$  лежало в диапазоне 1-2 согласно [1,8], а согласно [13] – в диапазоне 1.27-1.5. Рассматриваемый в работе рельеф имеет высоту  $h_m=1.775$  км и, кроме того, он заметно протяженнее. Тогда согласно (8) и [13], за счет увеличения высоты критическое значение должно лежать в диапазоне:  $\xi=(1.27-1.5)*1.775=(2.25-2.66)$ . Для Маркхотского хребта, где высота рельефа  $h_m=0.548$  км было получено, что критическое значение должно лежать в диапазоне  $\zeta=(1.27-1.5)*0.548=(0.69-0.72)$  [4]. Это подтверждает, что параметр  $\zeta$ , в первую очередь, зависит от  $h_m$ , а значения параметра  $\zeta$  могут служить однозначным критерием перехода к роторному режиму возмущений только приблизительно.

В работах [14, 15] авторы полагают, что найденные критические значения могут использоваться в качестве признака начала процесса «обрушения волн», трактуя этот эффект по-разному. Появление роторов Лонг в [11] рассматривал как признак потери репрезентативности модели, опираясь на представления классической гидродинамики, а именно на следующее: при появлении над горами в части пространства возвратных течений более тяжелые частицы воздуха располагаются над более легкими, такое течение должно терять устойчивость. Но экспериментально в этой же работе [11] было показано, что подобная ситуация существовала в реальности достаточно устойчиво и почти ламинарно. В работе [3] было проведено сопоставление расчетов по используемой в настоящей работе модели с прямыми измерениями в природе, которое показало, что устойчивость роторных циркуляций недооценивается. Результаты расчетов позволили сделать вывод, что значения параметра  $\zeta$  не могут служить однозначным критерием перехода к роторному режиму возмущений. Согласно этим расчетам, при  $\zeta$  равном 1.13 и 1.36 роторы над горами Крыма отсутствуют, при  $\zeta$  равном 1.21, 1.29 и 1.40 роторы находятся в начальной стадии развития, при  $\zeta$  больших 1.30 возникают замкнутые вихри, т.е. полностью развитые роторы. В настоящем исследовании высота гор была выше больше чем, на 500 м и как видим, это привело не только к увеличению критического значения  $\zeta$ , но и к более четкому определению его значения.

## Заключение

В настоящей работе было проведено исследование возмущений атмосферы при обтекании участка Главного Кавказского хребта, находящегося в пределах Республики Адыгея (г. Фишт) на основе применения нелинейной аналитической двумерной модели. Полученные результаты показывают четкую зависимость свойств возмущений от величины масштаба Лира. При увеличении  $\lambda_c$  наблюдается «сглаживание» возмущений и вырождение роторных зон. В работе рассмотрены условия появления роторов при обтекании воздушным потоком и степень их устойчивости при наличии стратификации. Показано, что появление роторов над горами определяется, в первую очередь, величиной безразмерной высоты гор, а их устойчивое существование в природе требует специальных исследований.

Вполне можно предположить, что в областях предсказания роторов в реальной природе возможны, например, такие варианты: устойчивое ламинарное течение, появление локальных очагов турбулентности, полное «обрушение волн».

## Список литературы

1. Кожевников В.Н. Возмущения атмосферы при обтекании гор. Москва, "Научный Мир", 160 стр. с илл., 1999.
2. Берзегова Р.Б., Беданок М.К. Возмущения атмосферы при обтекании горных массивов// Известия РАН. Физика атмосферы и океана, том 54, № 5. - Москва: Изд-во Pleiades Publishing, Ltd., 2018. – с. 538-543.
3. Кожевников В.Н. Моделирование атмосферных возмущений над горами Крыма// Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2019, Т. 55, № 4, С. 49-57.
4. Kozhevnikov V.N., Berzegova R.B., Bedanokov M.K. Modeling of the novorossiysk bora. Part 1. Atmospheric disturbances over the mountains of Novorossiysk// Russian Journal of Earth Sciences, 2019, Vol. 19, doi:10.2205 / 2019ES000684.
5. Кожевников В.Н., Павленко А.П. Возмущения атмосферы над горами и безопасность полетов.//Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. N 3. С. 301-314.
6. Кожевников В.Н., Беданок М.К. Нелинейная многослойная модель обтекания произвольного профиля // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 6. С. 780 - 792.
7. Кожевников В.Н., Беданок М.К. Волновые возмущения над горами Крыма. Теория и наблюдения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 4. С. 546 - 556.
8. Кожевников В.Н. К одной нелинейной задаче об орографическом возмущении стратифицированного воздушного потока// Известия АН СССР. Сер. геофиз.1963. № 7. С. 1108-1116.
9. Lyra G. Theorie der stationaren Leewellenstromung in freien Atmosphere// Z. Angew. Math. Und Mech, 1943, Vol. 23, № 1, pp. 1–28.
10. Berzegova R.B., Bedanokov M.K., Kozhevnikov V.N., Repina I.A. Energy modeling of Novorossiysk bora// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, издательство Institute of Physics Publishing (United Kingdom), том 231, № 1, 2019. doi: 10.1088/1755-1315/231/1/012010.
11. Long R.R. Some aspects of the flow of stratified fluids. III. Continuous density gradients// Tellus, 1955, Vol.7, № 3, pp. 341-357.
12. Lin Y.L. Mesoscale dynamics/ Cambridge University Press, 2007, 646 p.

13. Miles J.W. Lee waves in a stratified flow. Part II. Semi-circular obstacle// J. Fluid Mech., 1968, Vol. 33, № 4, pp. 803-814.
14. Шестакова А.А., Моисеенко К.Б., Торопов П.А. Гидродинамические аспекты эпизодов Новороссийской боры 2012-2013 гг.// Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2015, Т. 51, № 4, С. 1-13.
15. Ефимов В.В., Барабанов В.С. Моделирование Новороссийской боры// Метеорология и гидрология, 2013, Т. 38, № 3, С. 171-176.
16. Berzegova R.B., Kozhevnikov V.N., Bedanokov M.K. Modeling of the Novorossiysk bora: Part 2. Energetics of the of the atmosphere at the Novorossiysk bora, Russ. J. Earth Sci., Vol. 19, doi:10.2205/2019ES000685.
17. Bedanokov M.K., Berzegova R.B., Kuizheva S.K. Atmospheric disturbances in the airflow around mountains and the problem of flight safety in the mountains of the Republic of Adygeya// Ecologica Montenegrina, 2017, Vol. 14, pp. 136-142.

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВЕРХНЕГО СЛОЯ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ПО ДАННЫМ СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

<sup>1,2</sup>И.Е. Козлов, <sup>2</sup>Е.В.Зубкова, <sup>1</sup>Е.В. Плотников, <sup>1</sup>А.В. Артамонова,  
<sup>1</sup>Т.В. Михайличенко  
*igor.eko@gmail.com*

<sup>1</sup>*Морской гидрофизический институт РАН, Россия, г. Севастополь*  
<sup>2</sup>*Российский государственный гидрометеорологический университет,  
Россия, г. Санкт-Петербург.*

В последние десятилетия наблюдается активное изменение ледовых и гидрологических условий Северного Ледовитого океана (СЛО). Основное внимание специалистов уделяется исследованию физических механизмов, ответственных за существенное сокращение площади ледяного покрова в Арктике, а также процессам, влияющим на теплообмен, вентиляцию подповерхностных Атлантических вод и поступление тепла от них к нижней границе ледяного покрова. В этой связи менее всего изучена роль мезо- и субмезомасштабных гидрофизических процессов - короткопериодных внутренних волн (КВВ), вихрей, фронтов и филаментов, что объясняется в первую очередь их малыми пространственно-временными масштабами, требующими проведения специальных измерений.

Несмотря на то, что основные изменения в Арктике обусловлены атмосферными и термодинамическими процессами, исследование мезо- и субмезомасштабной динамики океана исключительно важно для понимания механизмов диссипации приливной энергии, формирования локальных очагов перемешивания, переноса тепла, биогеохимических элементов и загрязнений. Актуальность исследований определяется необходимостью изучения этих процессов для их дальнейшей параметризации и, как следствие, совершенствования численных гидродинамических моделей.

Интенсивное сокращение площади ледяного покрова и обширное очищение арктического региона ото льда не только в летний, но и в зимний периоды, позволяют в настоящее время эффективно использовать методы дистанционного зондирования океана из космоса для определения очагов генерации, структуры и кинематических характеристик различных гидрофизических процессов верхнего слоя СЛО [1-4].

В настоящей работе будут представлены результаты спутниковых наблюдений внутренних волн и вихрей на акватории СЛО, полученные авторами за последние годы в рамках ряда проектов РФФИ и РНФ. В качестве исходных данных были использованы массивы исторических и текущих измерений спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), анализ которых позволил определить «горячие точки» в поле вихрей и внутренних волн в Арктике, определить их пространственно-временные и кинематические характеристики.

На основе анализа спутниковых данных за летне-осенние периоды 2007, 2011 и 2018 гг. было выделено более 14 000 поверхностных проявлений

внутренних волн для всех безледных участков акватории СЛО. Показано, что помимо регулярной генерации в шельфовых районах арктических морей и вблизи бровки шельфа, значительное количество волн наблюдается над континентальным склоном. Результаты совместных спутниковых и судовых измерений к северу от арх. Шпицберген показали, что над континентальным склоном амплитуды внутренних волн могут достигать 20-50 м и существенно влиять на вертикальное перемешивание, вызывая турбулентные потоки тепла до  $100 \text{ Вт/м}^2$  в отдельных эпизодах [4].

Анализ вихревых структур выполнялся отдельно для безледных участков и прикромочной ледовой зоны (ПЛЗ) в двух районах СЛО – пролива Фрама [2] и акватории морей Чукотского и Бофорта [3]. Показано, что около 60-70% от общего количества зарегистрированных вихрей (около 10000 вихрей) являются циклоническими. Значительная их часть наблюдалась в районах с глубинами менее 300 м. Диапазон наблюдаемых диаметров вихрей составил от 1 до 70-80 км, но около 80% всех вихрей имели диаметры менее 10 км. Поскольку радиус деформации Россби для районов исследований составляет 3-12 км [5], основная часть наблюдаемых вихрей относится к субмезомасштабу. Впервые для вихрей ПЛЗ приводится зависимость между концентрацией льда в ПЛЗ и количеством зарегистрированных вихревых структур. Максимальное число вихрей было зарегистрировано на границе ПЛЗ и в областях с концентрацией льда до 20% [3].

*Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-35-20078 мол. а. вед, грантов РНФ № 18-77-00082, 21-17-00278 и государственного задания 0555-2021-0006.*

### **Список литературы**

1. Kozlov I.E., Plotnikov E.V., and Manucharyan G.E. (2020). Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations, *The Cryosphere*, 14, 2941–2947, <https://doi.org/10.5194/tc-14-2941-2020>.
2. Bashmachnikov I.L., Kozlov I.E., Petrenko L.A., Glock N.I., & Wekerle C. (2020). Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2019JC015832. <https://doi.org/10.1029/2019JC015832>
3. Kozlov I.E., Artamonova A.V., Manucharyan G.E., Kubryakov A.A. (2019). Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124 (9), 6601-6616. <https://doi.org/10.1002/2019JC015113>
4. Fer I., Koenig Z., Kozlov I.E., Ostrowski M., Rippeth T.P., & Padman, L., et al. (2020). Tidally forced lee waves drive turbulent mixing along the Arctic Ocean margins. *Geophysical Research Letters*, Vol. 47, e2020GL088083.
5. Nurser A.J.G., Bacon S. (2014). The Rossby radius in the Arctic Ocean. *Ocean Science*. Vol. 10. P. 967–975.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОПРАВКИ НА СОСТОЯНИЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

К.Н. Коночкин

*awesome.kostyan@ya.ru*

*Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, г. Москва, г. Зеленоград*

**Аннотация.** В данной статье описан процесс проектирования, обучения и тестирования нейронной сети, предназначенной для аппроксимации четырехпараметрической оценки поправки на состояние подстилающей поверхности. Поправка рассчитывается из данных спутниковой альтиметрии.

**Ключевые слова.** поправка, нейронная сеть, аппроксимация, параметрический метод, морская поверхность.

## Введение

Поправка на состояние подстилающей поверхности (англ. «sea state bias», *SSB*) является основной частью погрешности спутниковых измерений высоты морской поверхности. Более точная оценка данной поправки может сильно улучшить качество измерений, получаемых с помощью спутниковых альтиметров.

С помощью различных численных методов ранее была доказана зависимость величины поправки *SSB* от скорости ветра и значимой высотой волн, что в свою очередь позволило Челтону [1] вывести формулу для параметрической оценки данной поправки. Однако дальнейшего развития подход не получил.

Так как в открытом доступе можно найти большое количество альтиметрических данных с нескольких спутников, существует возможность обучения нейронной сети (НС) для оценки поправки *SSB*. В качестве первого шага к получению такой НС в данной статье описывается более простая НС, аппроксимирующая вышеописанную параметрическую оценку.

## Параметрическая оценка

Поскольку все эмпирические исследования показали, что поправка на состояние подстилающей поверхности увеличивается с ростом высоты волн, смещение традиционно задается как линейная функция значимой высоты волны *SWH* (significant wave height), что примерно соответствует четырехкратному стандартному отклонению высоты поверхности моря в пределах зоны действия альтиметра. Исследователи Баррик, Липа [2] и Срокош [3] предоставили теоретическую основу для данного формализма. Альтиметрические измерения уровня моря могут заданы в следующем виде:

$$h_{meas} = h_{true} + h_{error} + \Delta h_{SSB}, \quad (1)$$

где

$$\Delta h_{SSB} = bSWH, \quad (2)$$

поправка на состояние морской поверхности,  $h_{true}$  – истинный уровень моря,  $h_{error}$  – включает в себя все источники измерительных ошибок кроме поправки  $SSB$ . Как резюмировано у Челтона [1],  $\Delta h_{SSB}$  – представляется в виде (2), включающем в себя электромагнитное смещение, смещение трекинга, и любой вклад смещения асимметрии, пропорциональный  $SWH$ . Поправка на состояние подстилающей поверхности, вероятно, зависит других характеристик волнового поля помимо  $SWH$ , но это единственная волновая характеристика легко и однозначно извлекается из данных альтиметра.

Самым известным и точным параметрическим выражением для оценки поправки на состояние подстилающей поверхности на сегодняшний день (согласно [4]) остается четырехпараметрическая модель, предложенная Челтоном в 1994 г. [1]. Модель для коэффициента  $b$  сочетает в себе квадратичную зависимость поправки от скорости  $U$  ветра и окололинейную зависимость от значимой высоты волны  $SWH$ :

$$\Delta h_{SSB} = bH, \quad (3)$$

$$b = a_1 + a_2U + a_3U^2 + a_4SWH. \quad (4)$$

Уточненные параметры модели были взяты из статьи [5] и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оценки параметров уравнения (4) для 6 различных альтиметров

Альтиметр	Jason-1	TOPEX (Side A)	TOPEX (Side B)	ERS-1	ERS-2	GFO
$a_1$	-0.034376	-0.030578	-0.032113	-0.075043	-0.068219	-0.055742
$a_2$	0.001145	0.002776	0.002992	0.001413	0.001465	0.002743
$a_3$	-0.001969	-0.002962	-0.002780	-0.001790	-0.001701	-0.003756
$a_4$	0.000083	0.000127	0.000101	0.000098	0.000082	0.000153

### Схема нейронной сети

Так как от нейронной сети требуется аппроксимировать плохо обусловленную функцию от двух аргументов, потребовалось взять относительно большое число узлов для каждого из трех скрытых слоёв. Количество узлов обусловлено в том числе экспериментальным путем на ранних этапах эксперимента с менее массивными данными. Задачи построения сетей для аппроксимации функций подробно рассматриваются в работах [6, 7]. После ряда экспериментов была спроектирована нейронная сеть следующей конфигурации (рис. 1):

- Входной слой, состоящий из 2 узлов, соответствующих параметрам: значимая высота волны ( $SWH$ ) и скорость ветра ( $U$ );
- 3 скрытых слоя, состоящих из 200 узлов каждый
- Выходной слой с одним узлом, соответствующим поправке  $SSB$ .

В качестве функции активации для скрытых слоев 1, 2 и 3 была использована сигмоидальная функция:  $\sigma(x) = 1/(1 + e^x)$ . Ввиду отсутствия нормировки оценки  $SSB$  выходной слой не подвергался воздействию функции активации.

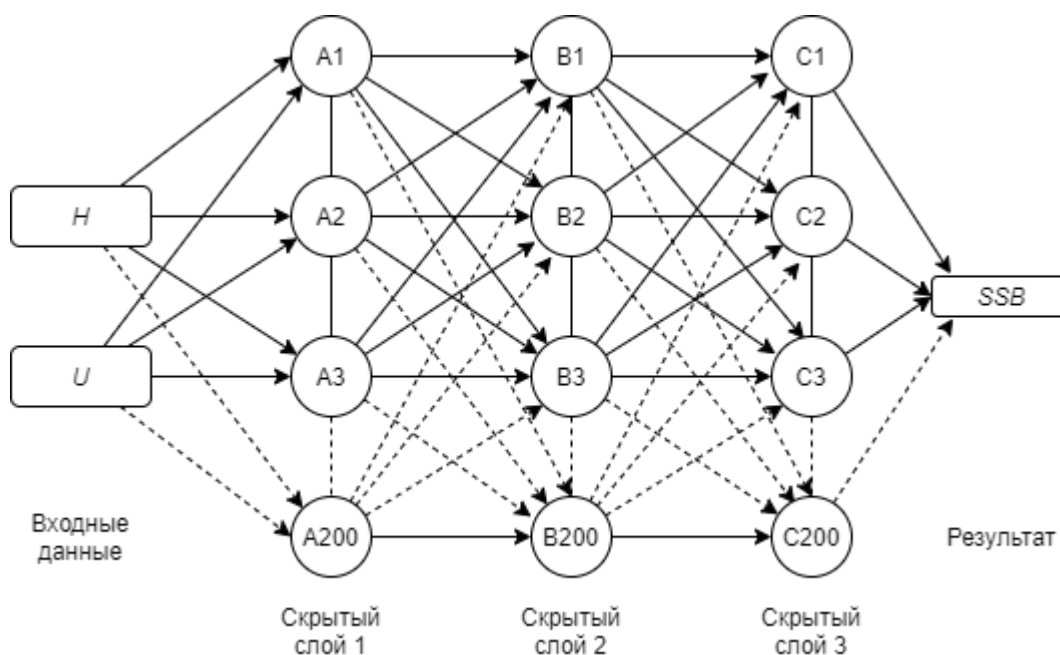


Рис. 1. Схема нейронной сети

Для реализации НС, ее обучения и тестирования был использован фреймворк глубокого обучения PyTorch.

#### Обучение и тестирование

Так как задача состоит в аппроксимации известной функции, был использован метод Монте-Карло, то есть для обучения и тестирования брались случайные данные двух типов: скорость ветра  $U$  и значимая высота волны  $SWH$ . Данные генерировались в общепринятых диапазонах (описанных, например, в статье [8]):  $0 \leq U \leq 21$ ,  $0 \leq SWH \leq 11$ . Размер данных для обучения: 2000.

Так как уравнение параметрической оценки имеет коэффициенты на несколько порядков меньше, чем входные данные, было решено помимо увеличения размера нейронной сети так же взять большое количество эпох обучения: 20000. Так же было подтверждено экспериментально, что на порядок меньшее число эпох дает заметно меньшую точность предсказаний (подробнее в п. **Результаты**). Следует отметить, что данные значения согласуются с общепринятыми соображениями по построению нейронных сетей, которые описаны в статье [9].

Ввиду неэффективности столь долгого обучения следующим шагом стала предобработка входных данных, а именно – нормализация. Это позволило ускорить процесс обучения на порядок.

Обучение происходит с помощью градиентного спуска. В качестве функции потерь взято среднеквадратичное отклонение, которое часто используется в задачах аппроксимации функций.

Так как вышеописанная нейронная сеть содержала в себе большое количество нейронов. Так же для обучения был использован метод *dropout*, который используется для решения проблемы переобучения нейронных сетей. Но даже с небольшим коэффициентом (1–5%) не удалось получить более



точных результатов, dropout наоборот не давал сети хорошо обучиться (подробнее в п. **Результаты**).

Для тестирования так же был взят набор случайно сгенерированных данных в тех же диапазонах размера 1000. В качестве оценки точности работы сети были рассмотрены ошибки по модулю и квадратичные отклонения. Первые показывают истинную величину ошибки предсказания НС, вторые же показывают степень обученности НС, так как именно среднее квадратичное отклонение данных использовалось в качестве функции потерь при обучении нейронной сети.

Отдельно следует отметить, что для аппроксимации по умолчанию были выбраны коэффициенты для альтиметра TOPEX (Side A). Так как все коэффициенты в таблице имеют незначительные отличия, выбор коэффициентов другого альтиметра не мог заметно повлиять на результаты экспериментов.

### Результаты

Результаты экспериментов приведены в табл. 2 в которой представлены:

- средняя и максимальная ошибка по модулю, которые соответствуют ошибке предсказания поправки *SSB* в метрах;
- среднее и максимальное квадратичное отклонение, что соответствует степени обученности НС.

Таблица 2

Результаты экспериментов

Эксперимент	Средняя ошибка по модулю	Среднее квадратичное отклонение	Максимальная ошибка по модулю	Максимальное квадратичное отклонение
2000 эпох обучения	0.01637109	0.00112446	0.29556941	0.08736128
20000 эпох обучения	0.00610398	0.00013638	0.03408128	0.00164047
2000 эпох обучения + dropout (5%)	1.78772786	5.65857846	9.51997900	90.63001251
2000 эпох обучения + нормирование	0.00515653	0.00005271	0.05834760	0.00340444
20000 эпох обучения + нормирование	0.00080109	0.00000489	0.00788736	0.00006221
2000 эпох обучения + нормирование + dropout (5%)	0.14495257	0.05199873	1.72400188	2.97218251

Цветом в таблице помечена строка с минимальными значениями для каждого столбца. Из данных таблицы очевидно, что предобработка данных путем нормирования ускорила обучение НС на порядок. Так же заметим, что большое количество эпох обучения было необходимо для достижения высокой точности предсказаний НС. Плюс ко всему, данные в таблице наглядно иллюстрируют отсутствие выгоды при использовании метода *dropout*.

В итоге при 20000 эпох обучения и нормировании входных данных поправка *SSB* оценивается с точностью до 0.8 мм, а пиковое значение ошибки

не превышает 8 мм. Так как значения поправки варьируются в диапазоне от 5 до 20 см (как описано в сборнике [4]), точность оценки не превышает 1% от значения величины, что является хорошим результатом для такой простой НС.

### **Заключение**

В результате проделанной работы удалось спроектировать и обучить нейронную сеть, предназначенную для аппроксимации функции параметрической оценки поправки на состояние подстилающей поверхности. Была проведена серия экспериментов для уточнения конфигураций сети. Спроектированная и обученная наилучшим образом нейронная сеть позволяет оценить поправку *SSB* с точностью до 1 миллиметра, что на порядок превышает точность самой параметрической оценки.

В дальнейшем планируется обучать нейронную сеть только на данных, полученных со спутников, что означает уже не просто аппроксимацию параметрической оценки, но, возможно, уточнение самой поправки.

### **Список литературы**

1. Chelton D.B. The sea state bias in altimeter estimates of sea level from collinear analysis of TOPEX data //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1994. – Vol. 99. – №. C12. – P. 24995-25008. doi: 10.1029/94JC02113.
2. Barrick D.E., Lipa B.J. Analysis and interpretation of altimeter sea echo //Advances in geophysics. – Elsevier, 1985. – Vol. 27. – P. 61-100. doi: 10.1016/S0065-2687(08)60403-3.
3. Srokosz M.A. On the joint distribution of surface elevation and slopes for a nonlinear random sea, with an application to radar altimetry //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1986. – Vol. 91. – №. C1. – P. 995-1006. doi: 10.1029/JC091iC01p00995.
4. Coastal altimetry / Eds. S. Vignudelli, A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste, – Berlin: Springer Science & Business Media, 2011. – 566 pp. doi: 10.1007/978-3-642-12796-0.
5. Scharroo R., Lillibridge J, Non-Parametric Sea-state Bias Models and Their Relevance to Sea Level Change Studies, – Silver Spring, Maryland, USA, NOAA Laboratory for Satellite Altimetry, 2005. –12 pp.
6. Mhaskar H.N., Micchelli C.A. Approximation by superposition of sigmoidal and radial basis functions //Advances in Applied mathematics. – 1992. – Vol. 13. – №. 3. – P. 350-373. doi: 10.1016/0196-8858(92)90016-P.
7. Barron A.R. Universal approximation bounds for superpositions of a sigmoidal function //IEEE Transactions on Information theory. – 1993. – Vol. 39. – №. 3. – P. 930-945. doi: 10.1109/18.256500.
8. Miao X., Miao H., Jia Y., Guo Y. Using a stacked-autoencoder neural network model to estimate sea state bias for a radar altimeter //Plos one. – 2018. – Vol. 13. – №. 12. – С. e0208989. doi: 10.1371/journal.pone.0208989.
9. Гридин В. Н., Солодовников В. И., Карнаков В. В. Выбор начальных значений и оптимизация параметров нейронной сети //Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2016. – №. 19. – С. 270-273.

# МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ БРАУНА

<sup>1</sup>Р.Ю. Королев, <sup>1,2,3</sup>С.А. Лебедев

kash244@yandex.ru; sergey\_a\_lebedev@mail.ru

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, г. Москва, г. Зеленоград

<sup>2</sup>Геофизический центр РАН, Россия, г. Москва

<sup>3</sup>Майкопский государственный технологический университет, Россия, г. Майкоп

**Аннотация.** Предложено решение нахождения значений параметров модели Брауна, при которых теоретический сигнал будет минимально отличаться от реального с помощью минимизации функционала ошибки. Для решения данной задачи был выбран метод наименьших квадратов. В качестве средств вычисления использовались язык программирования Python и библиотеки SciPy и NumPy.

**Ключевые слова.** Ретрекинг; модель Брауна; минимизация функционал ошибки, метод наименьших квадратов.

## Введение

На борту космического аппарата (КА) альтиметром по времени возврата отраженного импульса (*трекер*) определяется «предварительное» расстояние от спутника до подстилающей поверхности, которое при дальнейшей обработке формы отраженного импульса в наземном сегменте уточняется за счет процедуры ретрекинга.

Форма отраженного импульса представляет собой зависимость мощности отраженного импульса от времени, а в результате разложения в ряд Фурье [2] на борту КА она представляет собой зависимость мощности от телеметрических гейтов, которые соответствуют длительности зондирующего импульса.

## Постановка задачи

Имеется измеренная форма или мощность отраженного импульса  $V(t_i)$  в точках  $t_i$ , где каждой точке  $i$  (гейту – от 1 до 120) соответствует время измерения в секундах (рис. 1).

Теоретическая модель отраженного импульса описывает формулой Брауна [3, 4]:

$$P(t, \tau_0, h_{SWH}, \sigma_0, \xi) = K \frac{\sigma_0}{2} \exp\left(-\frac{4}{\gamma} \sin^2(\xi)\right) [1 + \operatorname{erf}(u)] \exp(-v), \quad (1)$$

$$\text{где } u = \frac{t - \tau_0 - \alpha \sigma_c^2}{\sqrt{2} \sigma_c}, \quad v = \alpha \left( t - \tau_0 - \frac{\alpha \sigma_c^2}{2} \right), \quad \alpha = \frac{4c}{\gamma H (1 + H/R)} \left( \cos 2\xi - \frac{\sin^2 2\xi}{\gamma} \right),$$

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_p^2 + (h_{swh}/2c)^2}, \quad \sigma_p = (0,5/\Delta F_{imp}), \quad \gamma = \frac{\sin^2 \Theta_{3dB}}{2 \ln 2} \approx 0,724 \cdot \sin^2 \Theta_{3dB},$$

$K$  – коэффициент пропорциональности,  $\sigma_0$  – коэффициент обратного рассеяния,  $\xi$  – угол отклонения оси антенны от положения надира,  $t$  – время

отражения зондирующего импульса,  $\tau_0$  – время отражения зондирующего импульса в телеметрических гейтах, соответствующее середине переднего фронта (в специализированной литературе называется *эпохой*),  $\sigma_c$  – среднеквадратичная высота шероховатости поверхности,  $\Delta F_{imp}$  – ширина зондирующего импульса,  $h_{swh}$  – значимая высота морских волн,  $\gamma$  – эффективная ширина диаграммы направленности антенны,  $\Theta_{3dB}$  – диаграммы направленности антенны на уровне 3 дБ по мощности,  $H$  – высота орбиты спутника относительно подстилающей поверхности,  $R$  – средний радиус Земли ( $R = 6371,22$  км).

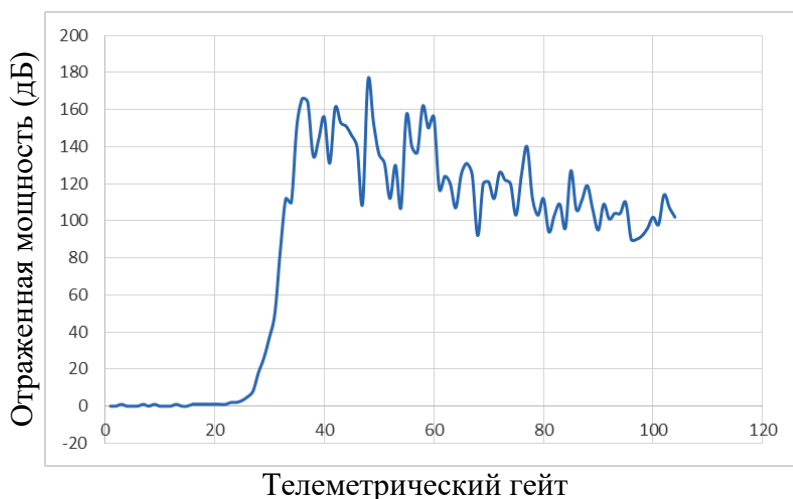


Рис. 1. Форма импульса отраженного от взволнованной морской поверхности

Алгоритм ретрекинга позволяет найти значения параметров  $\tau_0$ ,  $h_{swh}$ ,  $\sigma_0$  и  $\xi$  при которых отклонение измеренного сигнала  $V(t_i)$  от теоретического  $P(t_i)$  будет минимальным, т.е. найти минимум данного функционала ошибки  $\Omega = |V(t_i) - P(t_i, \tau_0, h_{swh}, \sigma_0, \xi)| \rightarrow \min$  (рис. 2). Минимум данного функционала ищется через равенство нулю производной функции  $\Omega - \partial\Omega^2/\partial X = 2\partial\Omega/\partial X=0$ , где  $X(t, \tau_0, h_{swh}, \sigma_0, \xi)$  – вектор параметров модели.

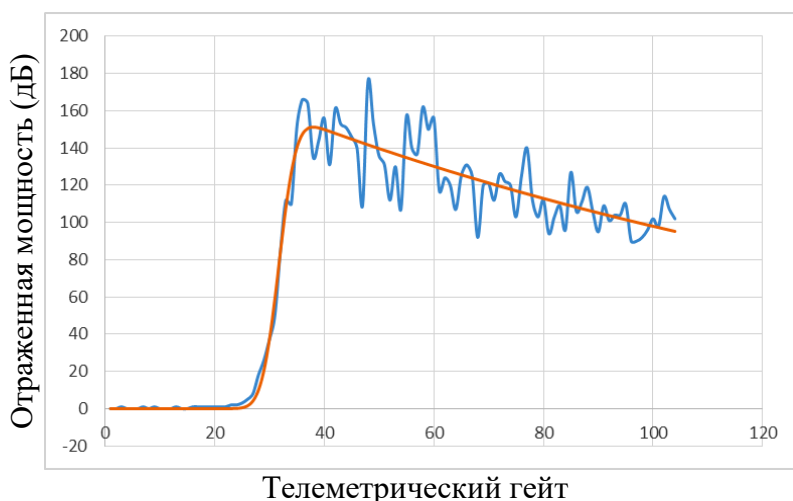


Рис. 2. Форма импульса отраженного от взволнованной морской поверхности (синяя линия) и теоретическая кривая, построенная по алгоритму ретрекинга (оранжевая линия)

Для обеспечения максимально точного подбора математической модели для реальных измерений был использован метод наименьших квадратов [1].

Используя итерационный метод наименьших квадратов, подбираем параметры математической модели для осреднённой формы сигнала.

$$\Delta X = (B^T \times B)^{-1} \times B^T \times L, \quad (2)$$

где  $B$  – матрица частных производных;  $L$  – вектор разниц измеренного и модельного сигнала;  $\Delta X$  – вектор параметров модели на соответствующем шаге итераций.

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \tau} & \frac{\partial P_1}{\partial h_{swh}} & \frac{\partial P_1}{\partial \sigma_0} & \frac{\partial P_1}{\partial \xi} \\ M & M & M & M \\ \frac{\partial P_n}{\partial \tau} & \frac{\partial P_n}{\partial h_{swh}} & \frac{\partial P_n}{\partial \sigma_0} & \frac{\partial P_n}{\partial \xi} \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} V_1 - P_1 \\ M \\ V_n - P_n \end{bmatrix}, \quad \Delta X = \begin{bmatrix} \Delta \tau \\ \Delta h_{swh} \\ \Delta \sigma_0 \\ \Delta \xi \end{bmatrix}.$$

где  $n$  – число измерений, в случае  $n = 104$ ,  $V_i$  – мощность измеренного сигнала,  $P_i$  – мощность модельного сигнала,  $i$  – номер телеметрического гейта. Производные от мощности модельного сигнала рассчитывались численным методом.

Для оценки точности метода наименьших квадратов использовался метод близнецов. Сначала по модели (1) с начальными параметрами:  $\tau_0 = 29$  гейт,  $h_{swh} = 2$  м,  $\sigma_0 = 155$  дБ и  $\xi = 15$  угловых секунд – рассчитывалась теоретическая кривая. Для расчета использовались параметры альтиметра Poseidon-3, работающего на спутнике Jason-3 для рабочей частоты в  $Ku$ -диапазоне:  $K = 1$ ,  $\Theta_{3dB} = 1,25^\circ$ ,  $\Delta F_{imp} = 320$  МГц,  $H = 1000$  км.

Затем используя метод наименьших квадратов находились значения параметров  $\tau_0$ ,  $h_{swh}$ ,  $\sigma_0$  и  $\xi$ .

Для этого были использованы следующие средства: язык программирования Python и такие библиотеки как NumPy [5] и SciPy [6]. Для реализации минимизации функционала ошибки была использована функция библиотеки SciPy – leastSquares [5].

### Результаты

Результаты расчетов после 757 итераций представлены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Параметр	Начальные параметры	Результаты расчетов
$\tau_0$ – эпоха (гейт)	29	28,857973
$h_{swh}$ – значимая высота морских волн (м)	2	2,020117
$\sigma_0$ – коэффициент обратного рассеяния (дБ)	155	154,336629
$\xi$ – угол отклонения оси антенны от положения надир (угловые секунды)	15	12,142848

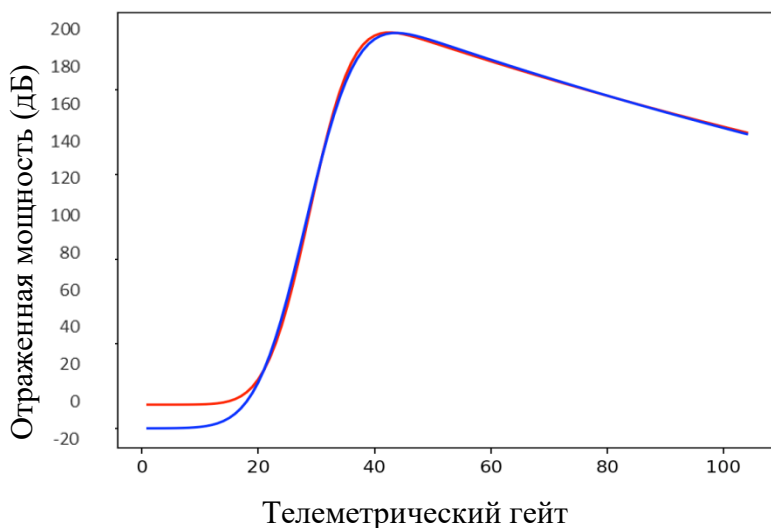


Рис. 3. Результаты восстановления параметров модели (табл. 1) методом наименьших квадратов. Синяя линия – модельная кривая, построенная по результатам расчетов, красная – модельная, построенная по начальным параметрам

### Заключение

В работе представлено применение метода наименьших квадратов, как одного из способов решения задачи минимизации функционала ошибки модели Брауна. Программирование проводилось на языке Python. Численная реализация метода наименьших квадратов станет основой для обработки реальных форм отраженных импульсов альтимтра.

### Список литературы

1. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Изд. 2-е, доп. и испр. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 349 с.
2. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления свёрток. – М.: Радио и связь, 1985. – 248 с.
3. Brown G. The average impulse response of a rough surface and its applications //IEEE transactions on antennas and propagation. – 1977. – Vol. 25. – № 1. – P. 67–74. doi: 10.1109/TAP.1977.1141536.
4. Brown G.S. A useful approximation for the flat surface impulse response //IEEE transactions on antennas and propagation. – 1989. – Vol. 37. – № 6. – P. 764–767. doi: 10.1109/8.29363.
5. SciPy Optimization // SciPy. - [Электронный ресурс] - Режим доступа. – URL: docs.scipy.org (Дата обращения 20.02.2021).
6. NumPy v1.20 Manual // NumPy. – [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: https:// numpy.org (Дата обращения 22.02.2021).

## СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ГОРНЫХ РАЙОНАХ РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН

Е.А. Корчагина

*helena.a.k@mail.ru*

*Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр РАН»,  
Центр географических исследований, Россия, г. Нальчик*

### **Введение**

Изменение экстремальных значений атмосферных осадков и температуры воздуха наиболее ощутимые последствия глобального потепления климата. При этом региональная динамика остается не до конца выясненной, особенно в деталях. С ростом значений этих климатических характеристик ожидается рост числа наводнений и связанных с ними угроз населению и экономике. Качественный характер изменений в режиме осадков с ростом температуры воздуха сильно меняется от региона к региону [1, 2].

В работе [3] на основе результатов моделирования показано, что экстремальность осадков растет с ростом температуры в регионах с высокой влажностью и, наоборот, снижается в регионах с дефицитом влаги. Это объясняет наблюдаемое разнообразие наблюдаемых на разных территориях вариантов динамики климата.

Авторы работы [4] пришли к аналогичным выводам на основе анализа наблюдений и моделирования в глобальном масштабе.

Вместе с тем, в работах [5-7] на основе анализа наблюдений установлено, что зачастую такого роста числа и мощности наводнений не обнаружено. Предполагаемые тому причины - это снижение влажности почвы, продолжительности осадков, уменьшения запасов снега [6].

В работе [6] авторы находят мало доказательств того, что увеличение количества сильных дождей при более высоких температурах приводит к аналогичному увеличению стока рек, при этом в большинстве регионов мира наблюдается уменьшение стока при более высоких температурах. И только для небольших водосборов увеличение количества осадков при более высоких температурах соответствует увеличению стока.

Среди причин увеличения частоты экстремальных природных явлений рассматривают изменение характера циркуляции атмосферы [1], рост влагосодержания в атмосфере при тенденции к потеплению [8]. Временная изменчивость интенсивности осадков сильнее зависит от роста температуры воздуха, чем их годовые суммы [9].

Для всей территории России установлен рост летом числа засушливых периодов и увеличение их продолжительности [10].

В горных районах Северного Кавказа на формирование стока горных рек оказывают не только количество атмосферных осадков, но и состояние почвы, время наступления и протекание периода половодья и др.

Исследование региональных изменений температуры воздуха и осадков актуальны для понимания происходящих процессов и оценки возможных последствий имеющихся тенденций климата для экономики и безопасности населения.

В настоящей работе исследованы горные и низкогорные районы Республики Дагестан. Рассмотрена динамика средней месячной температуры воздуха и месячных сумм атмосферных осадков. Особое внимание уделено динамике средних за месяц и сезон суточных и максимальных суточных осадков.

### **Материалы и методы**

При анализе динамики временных рядов важнейшая роль принадлежит качеству исходных данных. Для вычисления климатических характеристик таким качеством обладают данные, представленных в специализированных массивах ВНИИГМИ – Мировой центр данных [11, 12]., Отобранные в базу данных метеостанции рекомендованы для отслеживания изменений, происходящих с климатом на современном этапе. Горная зона Республики Дагестан представлена двумя метеостанциями: Сулак, высокогорная, расположенная на  $42^{\circ} 22'$  с.ш.,  $46^{\circ} 15'$  в.д., и Ахты, 1016 м,  $41^{\circ} 28'$  с.ш.,  $47^{\circ} 45'$  в.д. [11].

Наиболее удовлетворяющие требованиям однородности [13] ряды составлены с 1932 года, с 1966 года, когда установилась современная методика измерений на метеостанциях, и с 1976 года, который считается началом периода интенсивного потепления климата.

В качестве методов исследования динамики среднегодовых и сезонных сумм атмосферных осадков использованы статистическое моделирование, регрессионный анализ [14, 15].

Одной из задач настоящей работы является сопоставление динамики климатических характеристик средних сезонных температур и сумм атмосферных осадков за различные сезоны года. Такие характеристики имеют сильно отличающиеся абсолютные значения и шкалу измерений. В связи с этим ряды преобразованы к новому виду путем процедуры центрирования и нормирования на среднее квадратическое отклонение. Полученная процедура позволяет получить ряды в безразмерных единицах, все уровни которых находятся в диапазоне [-1..1].

### **Наблюдаемые изменения осадков в горной зоне Республики Дагестан**

Первое представление о динамике климатических характеристик дает анализ изменений ее годового хода. Годовой ход осадков и температуры воздуха отражает не только их режим, но и внутригодовой ход опасных гидрологических и метеорологических процессов. Эта климатическая характеристика рассчитывается по многолетним данным. Средние месячные суммы осадков рассчитаны по 30-летним периодам со сдвигом в 10 лет.

Годовой ход осадков в высокогорной зоне (метеостанция Сулак, высокогорная) имеет максимум, приходившийся на май с 1941 по 1990 годы, что включает в себя базисный период 1961-1990 годы, используемые для



мониторинга изменений климата. С 1971 года максимум годового хода осадков приходится на июнь и за последние тридцать лет достиг 15,4 % от общей годовой суммы осадков и стал ярко выражен (рисунок 1).

Годовой ход осадков для метеостанций приведен, рассчитанный по данным метеостанции Ахты, приведен на рис. 1.

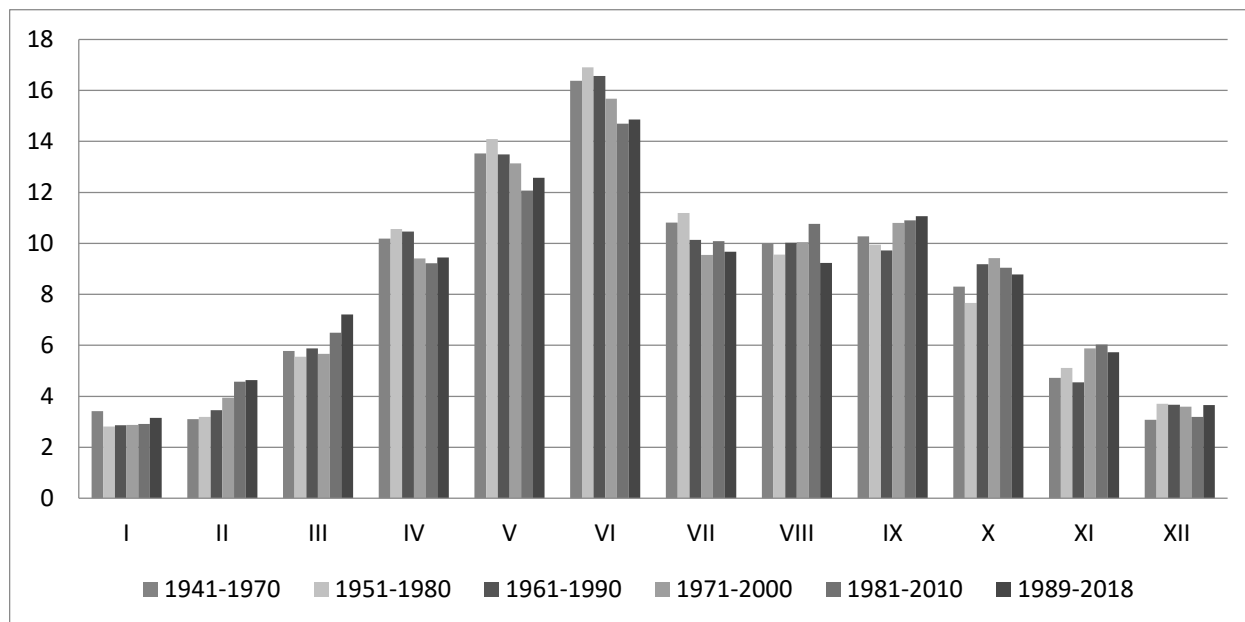


Рис. 1. Годовой ход осадков, метеостанция Ахты

Минимум годового хода приходится на январь. Начиная с 1951 года, заметна тенденция роста сумм осадков в феврале и марте и их снижение в апреле.

В отличие от высокогорной зоны, годовое распределение осадков по данным метеостанции Ахты имеет два максимума. Первичный максимум приходится на июнь, ярко выражен и составляет 15,2 – 16,7 % от общего годового количества. Вторичный максимум изменял свое положение между августом и сентябрем и в 1961-1990 годы и 1971-2000 в среднем приходился на август. Последние уровни ряда, начиная с 1981-2010 годов и по настоящее время, показывают, что вторичный максимум хорошо выражен в сентябре и составляет 11,3 % от общего количества осадков.

Динамика сезонного хода исследована на основе рядов средних по десятилетиям характеристик.

На рис. 2 и 3 приведен сезонный ход осадков в исследуемом районе для стандартизованных рядов.

Сезонный ход нормированных аномалий осадков в высокогорной зоне лучше согласован, чем в низкогорной. Минимум годовых осадков в высокогорных районах приходится на 1991-2000 гг. (74 мм/мес.). Причиной тому малоснежные зимы и сухое межсезонье. В низкогорных районах минимум обнаружен в 1931-1940 годах и может быть обусловлен недооценкой количества осадков вследствие устаревшей методики получения данных на метеостанциях до 1965 года. Вторичный минимум приходится на 1961-1970 годы из-за недостатка отрицательно аномалии осенне-зимних осадков.

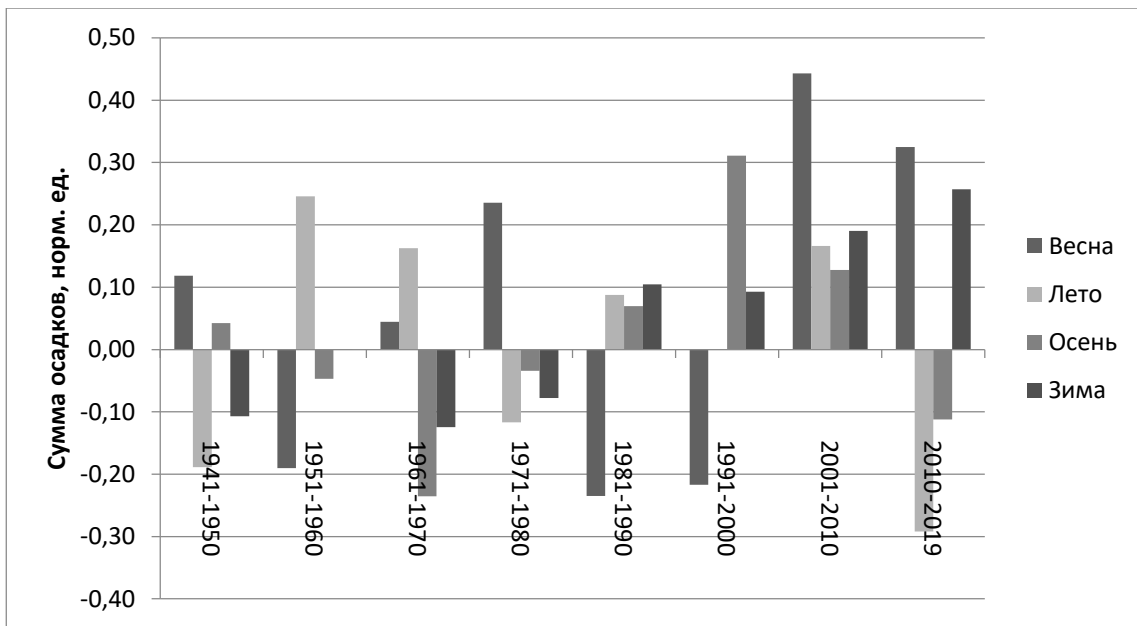


Рис. 2. Нормализованные уровни месячных сумм осадков, метеостанция Ахты

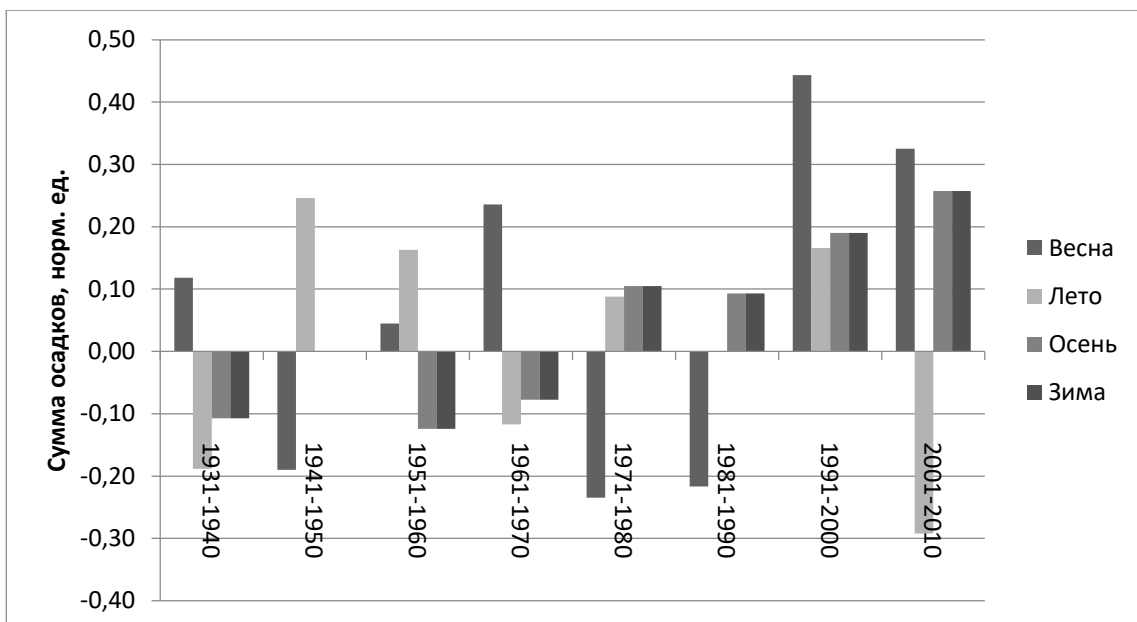


Рис. 3 Нормализованные уровни месячных сумм осадков, Метеостанция Сулак

Максимальное значение годовых осадков в высокогорных районах приходится на 1961-1970 годы. Все сезонные индексы превышают норму, особенно многоснежны зимы и весна. В низкогорном районе республики самым влажным стало десятилетие 2001-2010 годов. При этом на метеостанции Сулак высокогорная, отмечается вторичный максимум осадков.

Обобщая результаты ранжирования рядов сезонных и годовых уровней осадков можно сделать вывод, что наиболее влажные годы в высокогорье пришлись на периоды 1966-1978 и 1996-2013. В низкогорной зоне самый влажный период пришелся на текущее столетие.

Нормализованные уровни приземной температуры воздуха по данным метеостанции Ахты приведены на рисунке 4.

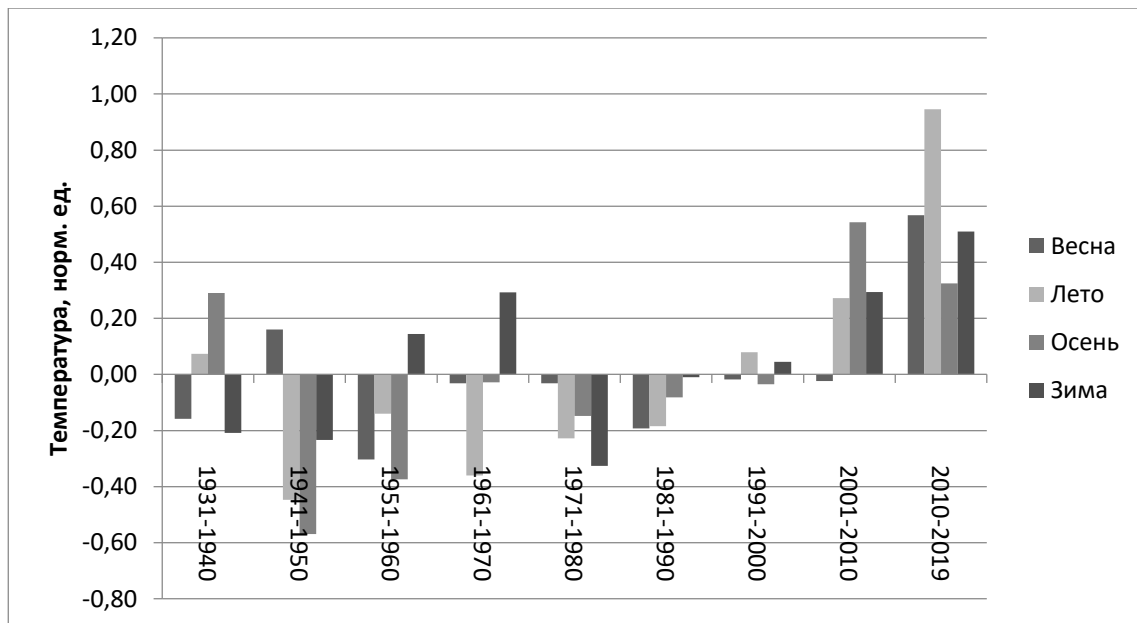


Рис. 4 Нормализованные уровни месячных средних температур, метеостанция Ахты

В низкогорной зоне самым холодным стало десятилетие 1941-1950 годов. Летний уровень 1991-2000 годов после долгого периода отрицательных значений (1941-1990 годы) вернулся к значениям начала ряда  $t_{1931-1940}^{\text{лето}} = 0,07$ . К концу периода летний уровень достиг значения, близкого к единице  $t_{2010-2019}^{\text{лето}} = 0,95$ . А вот осенние температуры имеют максимум в 2001-2010 годах  $t_{2001-2010}^{\text{осень}} = 0,54$ . Последний же уровень 2010-2019 годов мало отличается от уровня начала периода

$$t_{2010-2019}^{\text{осень}} = 0,32, t_{1931-1940}^{\text{осень}} = 0,29.$$

Десятилетие 2010-2019 отличается самыми теплыми зимними сезонами.

### Тенденции в динамике температуры и осадков

Моделирование линейных трендов временных рядов проведено для таких характеристик атмосферных осадков, как их месячные средние сезонные суммы, среднесуточная интенсивность, число дней с осадками более 1 мм, более 5 мм, более 20 мм.

Оценки уравнения линейной регрессии, признанные значимыми на уровне 0,05, приведены в табл. 1 и 2.

Кроме приведенных в табл. 2 значений также получено, что на отрезках времени 1966-2018 и 1976-2018 статистически значимо снижение числа дней с осадками более 30 мм в апреле и августе -0,2 сут./10 лет.

В высокогорной зоне с 1966 по 2018 годы положительны тренды в феврале, марте, июле, октябре и декабре. Тренды за остальные месяцы отрицательные. При этом достоверным на уровне 0,05 является только снижение количества осадков в апреле  $b_{1966-2018}^{\text{апрель}} = 3$ . В низкогорных районах на этом временном отрезке положительны тренды сумм осадков с сентября по март и в июле. Достоверен только рост осадков в марте

$$b_{1966-2018}^{\text{март}} = 3 \text{ мм/10 лет.}$$

Таблица 1

Оценки линейных трендов атмосферных осадков, метеостанция Сулак

Периоды, годы	Суммы осадков, мм/мес/10 лет		Дни с осадками более 1 мм, сут./10 лет		Среднесуточная интенсивность, мм/сут./10 лет	
	месяц	значение	месяц	значение	месяц	значение
1932-2018	март декабрь	4,7 1,9	март май	0,3 -0,4	все сезоны	0,2-0,5
1966-2018	апрель	-1,0	июнь	-2,1	март	0,46
1976-2018	март	1,2	март	0,8	март июль	1,1 0,8

Таблица 2

Оценки линейных трендов атмосферных осадков, метеостанция Ахты

Характеристика	1932-2018		1966-2018		1976-2018	
	месяц	значение	месяц	значение	месяц	значение
Дни с осадками более 1 мм, сут./10 лет, N <sub>1</sub>			май	0,5	март	0,6
Дни с осадками более 5 мм, сут./10 лет, N <sub>5</sub>	Январь Март декабрь	0,2 0,3 0,2	Июль	0,7	Январь Март июль	0,5 0,7 0,8
Дни с осадками более 10 мм, сут./10 лет, N <sub>10</sub>	Март зима	0,2 0,1			Март июль	0,6 0,5
Максимальная суточная интенсивность, мм/сут./10 лет P <sub>max</sub>	Февраль март	0,7 0,5	Март апрель	1,2 -1,2		
Среднесуточная интенсивность, мм/сут./10 лет P <sub>mean</sub>	Февраль Март ноябрь	0,3 0,2 0,2	Февраль Март апрель	0,4 0,4 -0,3		

В период интенсивного глобального потепления с 1976 года рост осадков в марте достоверен по двум метеостанциям. Скорость роста близка по своим значениям и составляет 11 мм/10лет по данным метеостанции Сулак высокогорная и 10 мм/10 лет по данным метеостанции Ахты.

Таким образом, рост различных месячных и суточных характеристик количества осадков в марте и июле, а также снижение некоторых суточных характеристик в апреле можно отнести к региональной тенденции изменения режима осадков в горных районах Республики Дагестан.

На локальные особенности динамики следует отнести снижение количества дней с осадками более 1 мм в мае (1932-2019 годы) и в июне (1966-2019 годы) в высокогорной зоне. В низкогорной зоне наиболее яркие локальные особенности выражены ростом различных средних месячных и суточных характеристик осадков в январе и феврале.

Характеристики рассчитанных линейных трендов средней месячной и сезонной температуры воздуха в низкогорной части исследуемого региона приведены в табл. 3. Жирным шрифтом выделены оценки линейных трендов, статистически значимые на уровне 0,05.

Таблица 3

Характеристики линейных трендов температуры воздуха, метеостанция Ахты

Месяц, сезон	1931-2019		1966-2019		1976-2019	
	<i>b</i> , °C/10лет	p-value	<i>b</i> , °C/10лет	p-value	<i>b</i> , °C/10лет	p-value
Январь	<b>0,22</b>	0,04	0,33	0,17	0,46	0,09
Февраль	0,08	0,54	<b>0,52</b>	0,04	<b>0,69</b>	0,03
Март	<b>0,22</b>	0,05	<b>0,61</b>	0,00	<b>0,84</b>	0,00
Апрель	0,09	0,32	0,01	0,97	-0,04	0,86
Май	0,02	0,73	0,22	0,06	<b>0,51</b>	0,00
Июнь	<b>0,14</b>	0,01	<b>0,43</b>	0,00	<b>0,57</b>	0,00
Июль	<b>0,14</b>	0,02	<b>0,36</b>	0,00	<b>0,44</b>	0,00
Август	<b>0,17</b>	0,02	<b>0,45</b>	0,00	<b>0,58</b>	0,00
Сентябрь	<b>0,16</b>	0,05	<b>0,40</b>	0,01	<b>0,33</b>	0,04
Октябрь	0,14	0,13	<b>0,36</b>	0,04	<b>0,63</b>	0,00
Ноябрь	0,09	0,30	-0,18	0,34	0,01	0,97
Декабрь	0,20	0,06	0,21	0,34	0,28	0,35
Год	<b>0,14</b>	0,00	<b>0,31</b>	0,00	<b>0,44</b>	0,00
Весна	0,11	0,07	<b>0,28</b>	0,01	<b>0,44</b>	0,00
Лето	<b>0,15</b>	0,00	<b>0,41</b>	0,00	<b>0,53</b>	0,00
Осень	<b>0,13</b>	0,04	0,19	0,12	<b>0,32</b>	0,02
Зима	<b>0,16</b>	0,02	<b>0,35</b>	0,03	<b>0,48</b>	0,01
Май-сентябрь	<b>0,13</b>	0,00	<b>0,37</b>	0,00	<b>0,49</b>	0,00

В низкогорной зоне за период 1966-2019 годы все тренды положительны, за исключением ноября. Статистически значимы тенденции потепления за период февраль и март.

На интервале 1976-2019 годы тренды средней месячной температуры воздуха положительны в течение всего года. Исключение составляет месяц апрель. Его тренд отрицательный, но статистически не достоверный. Также недостоверным является рост температуры с ноября по январь.

### Заключение

Исследование локальной и региональной динамики климата задача актуальная в эпоху быстрых климатических изменений и связана с проблемой опасных природных явлений. Для высокогорной и низкогорной частей Республики Дагестан выявлены следующие тенденции.

Рост различных месячных и суточных характеристик количества осадков в марте и июле, а также снижение некоторых суточных характеристик

в апреле являются изменениями регионального масштаба для горных районов Республики Дагестан.

В высокогорной зоне локальные изменения динамики выражены в снижении количества дней с осадками более 1 мм в мае (1932-2019 годы) и в июне (1966-2019 годы). В низкогорной зоне наиболее яркие локальные особенности выражены ростом различных средних месячных и суточных характеристик осадков в январе и феврале. А также на отрезках времени 1966-2018 и 1976-2018 статистически значимо снижение числа дней с осадками более 30 мм августе -0,2 сут./10 лет.

В низкогорной зоне за период 1966-2019 годы все тренды положительны, за исключением ноября. Статистически значимы тенденции потепления за период февраль и март.

На интервале 1976-2019 годы тренды средней месячной температуры воздуха положительны в течение всего года. Исключение составляет месяц апрель Его тренд отрицательный, но статистически не достоверный. Также недостоверным является рост температуры с ноября по январь.

Приземная температура воздуха в низкогорной части республики обнаруживает положительные тенденции в течение почти всего года (за исключением ноября). Обращает на себя внимание достоверность роста температуры в феврале и марте в связи с однонаправленными тенденциями в суточных характеристиках осадков в этой части республики. Здесь достоверен рост средней и максимальной за месяц суточной интенсивности осадков. Также обращает на себя внимание тенденция к снижению здесь температуры воздуха в апреле, хоть она и статистически незначима, но сопровождается значимым снижением средней за месяц суточной интенсивности осадков. Это показывает характер влияния динамики температуры воздуха на режим осадков в исследуемом регионе.

### Список литературы

1. Malygina, N., Papina, T., Kononova, N. *et al.* Influence of atmospheric circulation on precipitation in Altai Mountains. *J. Mt. Sci.* **14**, 46–59 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4162-5>
2. Корчагина Е.А. Исследование колебаний элементов климата в горных районах Западного и Центрального Кавказа методами математической статистики // Известия КБНЦ РАН. 2020. №3(95). С. 64-73
3. Prein, AF; Rasmussen, RM; Ikeda, K; Liu, CH; Clark, MP; Holland, GJ The future intensification of hourly precipitation extremes // *Nature climate change*, 2017. V.7. No.1. pp.48+
4. Yin, Jiabo; Gentine, Pierre; Zhou, Sha; Sullivan, Sylvia C.; Wang, Ren; Zhang, Yao; Guo, Shenglian Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes// *Nature communications*, 2018. V.9. No.4389 Article Number 4389 DOI 10.1038/s41467-018-06765-2
5. Blöschl G et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*. 2019. Sep; 573(7772):108-111. DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6.
6. Sharma, A.; Wasko, C.; Lettenmaier, D. P. If Precipitation Extremes Are Increasing, Why Aren't Floods? // *Water resources research*, 2018. V.54. No.11. Pp.8545-8551
7. Wasko, C.; Sharma, A. Global assessment of flood and storm extremes with increased temperatures // *Scientific reports*, 2017. V.7. No. Article Number 7945. DOI 10.1038/s41598-017-08481-1

8. Trenberth K. Changes in Precipitation with Climate Change. *Climate Change Research // Climate Research*. - 47. – pp. 123-138. –DOI:10.3354/cr00953.
9. Goutam Konapala et al 2017 *Environ. Res. Lett.* 12 024009
10. Ye, H., & Fetzer, E. J. (2019). Asymmetrical shift toward longer dry spells associated with warming temperatures during Russian summers. *Geophysical Research Letters*, 46. <https://doi.org/10.1029/2019GL084748>
11. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. «Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России». - Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 - URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения 07.03.2019)
12. Bulygina, O. N., & Razuvaev, V. N. (2012). Daily temperature and precipitation data for 518 Russian meteorological stations. Oak Ridge, Tennessee: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy doi: 10.3334/CDIAC/cli.100
13. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals - WMO; 2017.
14. Корчагина Е.А. Исследование температурного режима в горных районах Кабардино-Балкарии и Карачаево-Черкесии в 1951-2015 гг. // Устойчивое развитие горных территорий. 2019. Т.11. no.4(42). С. 449-458
15. Корчагина Е. А. Исследование устойчивости тенденций элементов климата в высокогорье Карачаево-Черкесии с 1959 по 2017 гг. // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. - 2018. - № 3(23). - С. 106-115. - DOI: 10.18454/2079-6641-2018-23-3-106-115

# ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ И РЕГИОНАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ИНФРАСТРУКТУРУ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

<sup>1,3</sup>Е.А. Костяная, <sup>1,2,3</sup>А.Г. Костяной, <sup>3,4,5</sup>С.А. Лебедев,  
<sup>1,3</sup>И.В. Серых

*kostianou@gmail.com; sergey\_a\_lebedev@mail.ru*

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, г. Москва

<sup>2</sup>Московский университет им. С.Ю. Витте, Россия, г. Москва

<sup>3</sup>Геофизический центр РАН, Россия, г. Москва

<sup>4</sup>Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, г. Москва, г. Зеленоград

<sup>5</sup>Майкопский государственный технологический университет, Россия, г. Майкоп

***Аннотация.** В данной статье рассматриваются различные аспекты воздействия экстремальных погодных условий и регионального изменения климата на железнодорожную инфраструктуру. Обсуждаются воздействие температуры воздуха, таяние вечной мерзлоты, сильные ветры, наводнения и повышение уровня моря. В статье делается акцент на необходимость изучения влияния экстремальных погодных условий и регионального изменения климата на инфраструктуру железных дорог на территории Российской Федерации, особенно в тех регионах страны, которые уже сталкиваются или могут вскоре пострадать от таких явлений, а именно в Калининградской области, в районе между Туапсе и Адлером в Краснодарском крае, на острове Сахалин, в Карелии и Мурманской области.*

***Ключевые слова.** Изменение климата, экстремальные погодные условия, железнодорожная инфраструктура.*

## **Введение**

Изменение климата является серьезной проблемой, которая затрагивает не только окружающую среду, но также общество и мировую экономику. Было опубликовано огромное количество научных статей и отчетов не только с целью анализа прошлых и нынешних тенденций изменения климата и его прогнозов, но и для оценки воздействия изменения климата на здоровье человека, сельское хозяйство, морскую среду и многие другие области. Некоторые из таких исследований сосредоточены на влиянии изменения климата на железнодорожную инфраструктуру, которая является важной частью транспортной сети любой страны (Костяной и др., 2017; Kostianaia et al., 2021). Согласно Пятому оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (2014), изменение климата неоспоримо. По прогнозам, в двадцать первом веке температура поверхности суши и океанов повысится, периоды аномально высоких температур воздуха, с высокой вероятностью, будут происходить чаще, а также экстремальные осадки будут более интенсивными и регулярными во многих частях мира. Ожидается также повышение уровня Мирового океана и полузакмнутых



морей. Очевидно, что такое изменение климата может оказать значительное неблагоприятное воздействие на железнодорожную инфраструктуру, поскольку такие изменения могут привести, например, к температурному выбросу пути (искривление железнодорожных путей), затоплению рельсов, расширению разводных мостов, перегреву электрического оборудования и его повреждению, размыву мостов, оседанию грунта, ухудшению состояния дорожного покрытия, повреждению пирсов, береговой эрозии путей, а также увеличению числа железнодорожных аварий в целом (Rail Safety and Standards Board, 2016; Костяной и др., 2017; Li & Kaewunruen, 2019; Kostianaia et al., 2021). Таким образом, крайне важно изучать, какие воздействия изменения климата ждут железнодорожный транспорт в ближайшем будущем и какие меры адаптации нужно применять, чтобы снизить потенциальные финансовые убытки от таких воздействий, а также свести к минимуму возможность возникновения несчастных случаев.

Элементы железнодорожной инфраструктуры подвержены разного рода воздействиям как непосредственно от движения поездов, так и окружающей среды. За последние 100 лет интенсивность движения изменилась, и в то же время во многих зонах существенно изменился климат и возросла сейсмическая активность. Все это привело к усилению опасных процессов (оползни, сели, лавины, наводнения) и является причиной быстрого устаревания существующей инженерной, геологической, ландшафтной и климатической информации, заложенной в проекты железнодорожной инфраструктуры.

Цель данной статьи - предоставить краткий обзор воздействия экстремальных погодных условий и регионального изменения климата на инфраструктуру железных дорог в международном масштабе. Основное внимание будет уделено изменению температуры, вечной мерзлоте, ветру, наводнениям и повышению уровня моря. В статье делается акцент на необходимость изучения влияния экстремальных погодных условий и регионального изменения климата на инфраструктуру железных дорог на территории Российской Федерации, особенно в тех регионах страны, которые уже сталкиваются или могут вскоре пострадать от таких явлений.

### **Влияние изменения температуры**

Одним из наиболее ощутимых последствий изменения климата является повышение температуры, которое может оказать прямое влияние на железнодорожную инфраструктуру. В Великобритании, согласно отчету Rail Safety and Standards Board (2003), жаркое сухое лето, как ожидается, приведет к температурному выбросу пути и росту необходимости установки систем кондиционирования воздуха. «Температурный выброс пути» - это термин, описывающий большие поперечные смещения непрерывных сварных рельсовых путей (рис. 1). Такие смещения подвержены воздействию высоких и низких температур (соответственно, расширение или сжатие) (Nemry and Demirel, 2012). Кроме того, жаркое сухое лето в Великобритании может увеличить вегетационный период и потребовать изменения обычных процедур по удалению листьев и другой растительности с железнодорожных

путей (Baker et al., 2009). Важным фактором, способствующим деформации пути, является нагрузка на рельсы, поэтому при повышении температуры целесообразно вводить ограничения скорости движения поездов. Например, в Великобритании при температуре воздуха 36°C ограничение скорости движения требуется независимо от температуры самих рельсов. Температура, при которой рельс может деформироваться, также зависит от состояния самого рельса (Dobney et al., 2009).



Рис. 1. Пример «температурного выброса пути» в Австралии (Mandal & Lees, 2016)

### **Вечная мерзлота**

Значительная часть железнодорожной инфраструктуры восточной части Российской Федерации, а также отдельные участки на Кольском полуострове расположены в зоне вечной мерзлоты (рис. 2). Чрезвычайно сложные инженерно-геологические условия усугубляются естественной климатической и технологической деградацией вечной мерзлоты в основании трассы. Кроме этого, железнодорожная инфраструктура постоянно или периодически подвергается воздействию следующих природных процессов и явлений: абразия берегов, сели, наводнения, эрозия, оползни, карстовые провалы, суффuzionные просадки, лед, термокарст, термоэрозия и солифлюкция, лавины и др. (Мировой опыт..., 2017).

Участки, расположенные в зоне вечной мерзлоты, характеризуются повышенной деформируемостью, вызванной криогенными процессами в грунтах фундамента, в первую очередь, обусловленными оседанием слоев на оттаивающем основании (со скоростью до 10-20 см в год). Причины деформаций в первые десятилетия после строительства объектов инфраструктуры на мерзлых грунтах связаны с деградацией вечной мерзлоты у основания, вызванной нарушением естественных условий теплообмена между атмосферой и грунтовым массивом, оттаиванием и уплотнением отложений. В дальнейшем преобладающим фактором деформируемости становятся пластические деформации обводненных расплавленных грунтов с их выдавливанием в стороны под весом пласта и динамической нагрузкой поезда (Мировой опыт..., 2017).



Рис. 2. Железные дороги Российской Федерации и зоны вечной мерзлоты (Мировой опыт..., 2017)

Дополнительным фактором в деградации мерзлых пород в основании пути и искусственных сооружений являются изменения климатических условий, которые наблюдаются в последние десятилетия в районе железнодорожной инфраструктуры на севере и востоке России, и на Кольском полуострове, в частности. К таким изменениям относятся постепенное повышение среднегодовых температур (до  $0,5^{\circ}\text{C}$  за десятилетие), а также региональные климатические изменения, связанные с антропогенными воздействиями (прежде всего, с созданием водохранилищ). В течение двадцатого века произошло повышение температуры верхних слоев многолетнемерзлых грунтов и увеличение глубины сезонного протаивания. Более того, эти процессы ускорились за последние четыре десятилетия (Второй оценочный доклад..., 2014).

Таяние вечной мерзлоты является проблемой для всего мира. Так, кроме России (рис. 2), это может затронуть несколько железнодорожных линий в Норвегии и Швеции (рис. 3), десятков линий в Канаде и на Аляске (США), а также в высокогорном Китае.

### **Сильные ветра**

Сильный ветер может вызвать потерю контакта токосъемника с контактным проводом, увеличить риск схода с рельсов или опрокидывания поезда.

### КАРТА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ СЕВЕРНОЙ ЕВРОПЫ С ЗОНАМИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ



Рис. 3. Железные дороги Северной Европы и зоны вечной мерзлоты в Норвегии, Швеции и Финляндии (Мировой опыт..., 2017)

Высокоскоростные поезда стали предметом исследования во многих странах, например, поезда X2000 в Швеции (Andersson et al., 2004), ICE в Германии (Diedrichs et al., 2007) и Class 390 Pendolino в Великобритании. (Baker et al., 2004). Исследование, проведенное в Австрии, показало, что ветер со скоростью более 120 км/ч может при определенных условиях опрокинуть поезд или нанести серьезный ущерб. Скорость ветра более 130 км/ч может вызвать вибрацию контактного провода, что может увеличить риск серьезных проблем с токосъемником (Rachouy & Spazierer, 2008). Сильный ветер также может привести к авариям и нарушению работы железнодорожной сети из-за столкновения поездов с упавшими деревьями, ветвями или строительным мусором, осевшим на рельсах (Baker et al., 2009). Такие высокие скорости ветра сейчас чаще встречаются в Европе. Например, 18 января 2007 г. по Европе прокатился ураган, максимальная скорость которого достигала



216 км/ч, в Германии - 148 км/ч, а в Австрии - 140 км/ч. 18 января 2018 года шторм Фредерике пересек северную Европу с сильнейшими ветрами (до 203 км/ч у Броккена, Германия). Компания Deutsche Bahn отменила все дальнейшее сообщение и наняла дополнительно 150 рабочих из-за повреждения железных дорог вследствие поваленных деревьев. Общий ущерб оценивается от 1 до 2,6 млрд евро. 23 сентября - 4 октября 2019 г. шторм Лоренцо затронул Великобританию, Ирландию и Францию с порывами ветра до 163 км/ч, ущерб оценивался в 284–330 млн евро. 7-16 февраля 2020 года шторм Клара затронул Великобританию, Ирландию, остров Мэн, Северную Европу, Западную Европу, Центральную Европу и Восточную Европу с порывами ветра до 219 км/ч, ущерб составил 1,6-1,9 млрд евро. 13-19 февраля 2020 года шторм Деннис затронул Великобританию, Ирландию, Исландию, Норвегию, Швецию и Нидерланды с порывами ветра до 230 км/ч (List of European windstorms, 2020).

### **Наводнение**

Наводнение - еще одна серьезная проблема для железнодорожной инфраструктуры и предмет многих исследовательских и оценочных докладов. Например, исследование Кафаленоса и Леонарда (2008) о влиянии изменения климата на транспорт США в северной части Мексиканского залива показало, что от 30 до 40% железных дорог региона будут затронуты волнами высотой от 5,5 до 7 метров из-за прогнозируемого увеличения интенсивности и количества ураганов, связанных с изменением климата. В Великобритании прогнозируемые более частые теплые и влажные зимние периоды, по оценкам, приведут к затоплению участков железных дорог, усилению воздействия на дренажные системы и возникновению проблем с рельсовыми цепями. В то же время ожидается сокращение числа инцидентов из-за снега, льда или низких температур в целом (Baker et al., 2009).

Сильные дожди стали серьезной проблемой для железнодорожной инфраструктуры в прибрежной зоне Черного моря Краснодарского края Российской Федерации. Они приводят к значительному повышению уровня воды в реках, затоплению населенных пунктов, автомобильных и железных дорог, а также к оползням (рис. 4-6).

Такие сильные дожди прошли 8 августа 2002 г. в районе г. Новороссийска; 6-7 июля 2012 г. за ночь выпало пятимесячное количество осадков (275 мм) в районе Крымска, Новороссийска и Геленджика; 7-8 сентября 2018 г. проливные дожди обрушились на всю прибрежную зону от Адлера до Керченского пролива; 23-25 октября 2018 г. проливные дожди разрушили автомобильные и железные дороги, а также мосты в Туапсинском районе (рис. 5-7); 24 июня 2019 года проливные дожди вызвали оползни, повредили дороги и туристическую инфраструктуру в горно-курортном районе Красная Поляна близ Адлера; 29 июня, 16 и 25 июля 2019 года снова обрушились сильные дожди и затопили город Сочи; 17 августа 2019 г. Сочи и Лазаревское затопили проливные дожди; 6 сентября 2019 года в Хостинском районе Сочи произошло наводнение, оползни повредили дороги; 17 сентября

2019 г. снова проливной дождь обрушился на Сочи, Хосту и Адлер (Kostianou et al., 2019).



Рис. 4. Наводнение в Сочи 25.06.2015 г.



Рис. 5. Наводнение в Сочи 25.06.2015 г.

Инфраструктура российских железных дорог часто страдает от наводнений в Приморье, Амурской области, Хабаровском крае и Сахалине на Дальнем Востоке России. Интенсивные атмосферные циклоны приносят в эти регионы проливные дожди и сильный ветер.



Рис. 6. Повреждение железнодорожного пути в районе Туапсе из-за сильных дождей и паводков вдоль реки Туапсинка в октябре 2018 года (Kostianaia et al., 2021)

### **Повышение уровня моря**

В Российской Федерации есть три прибрежных участка железных дорог, которые требуют тщательного мониторинга в связи с повышением уровня моря или наводнениями. Это железнодорожные участки на острове Сахалин, в районе между городами Туапсе и Адлер в Краснодарском крае на Черном море и в Калининградской области на Балтийском море. На острове Сахалин железные дороги тянутся на север от города Южно-Сахалинск вдоль западного (Японское море) и восточного (Охотское море) берегов острова в непосредственной близости от береговой линии. На Черном море линия Туапсе - Адлер в России и южнее до Сухума в Абхазии также проходит по берегу, а во многих местах - по пляжам курортных зон. Штормы с высокими волнами приводят к эрозии берегов и воздействуют на эти участки железных дорог, и с повышением уровня моря эта проблема будет значительно усугубляться.

В Калининградской области нет железных дорог, проходящих вдоль побережья, однако аналогичная проблема может возникнуть в ближайшие десятилетия из-за повышения уровня моря и опускания земной коры в этом районе. Это может вызвать ускоренное затопление низменностей Калининградской области, что приведет к значительному расширению русла реки Преголи. Такое расширение может фактически превратить Самбийский полуостров в остров, отделив его от материка в районе города Гвардейск. Это потребует строительства ряда новых мостов и переноса части железнодорожных путей. В связи с этим чрезвычайно важно проведение исследований повышения уровня моря для Балтийского, Черного, Японского и Охотского морей, а также волнового режима и береговой эрозии на территориях, прилегающих к указанным участкам железнодорожной сети.

В Республике Карелия и Мурманской области инфраструктура железных дорог может пострадать от повышения уровня Ладожского и

Онежского озер, многочисленных рек и озер Карелии, а также Белого моря, вблизи которых расположены участки РЖД. Так, например, 30 мая 2020 г. сильные дожди привели к паводку, который разрушил железнодорожный мост через небольшую реку Кола на перегоне между станциями Выходной и Кола. Единственная железнодорожная нитка между Кольским Заполярьем и Большой землей, которая несла на себе около 60% от общего грузопотока Мурманской области, была полностью перерезана на 4 месяца, пока не был построен новый мост. Инфраструктура ОАО «РЖД» в этом регионе особенно уязвима перед негативными факторами регионального изменения климата, поскольку главной проблемой участка Волховстрой - Мурманск является тот факт, что из 1320 километров его длины более 340 километров составляют однопутные участки, что ограничивает его пропускную способность и делает его уязвимым. Кроме того, 30 апреля 2020 г. Правительство РФ поставило задачу увеличить перевозки с 28 до 44 млн тонн в год на участке Мурманского отделения Октябрьской железной дороги к 2023 году, а не к 2035, как планировали ранее.

### **Заключение**

Влияние изменения климата на инфраструктуру железных дорог неоспоримо. Человеческие и экономические потери могут быть огромными, поэтому важно, чтобы страны разработали меры адаптации для предотвращения повреждения инфраструктуры, аварий, задержек и отмен железнодорожных перевозок. Некоторые из таких мер требуют дополнительных исследований и разработок систем предупреждения, выполнения оценок рисков, создания новых инженерных решений и технологий, а также разработки необходимых регламентов. Все это требует времени и инвестиций, а также должно планироваться и выполняться своевременно. Некоторые регионы, возможно, еще не испытали столь разрушительного воздействия изменения климата на железнодорожную инфраструктуру, однако, согласно прогнозам, они могут иметь такие последствия в ближайшем будущем или через 20, 30 или 50 лет. Поэтому уже сейчас при реализации любых новых инженерных, строительных и железнодорожных проектов необходимо учитывать возможное влияние экстремальных погодных условий и изменения климата, а также уже существующий международный опыт.

*Исследование выполнено в рамках проекта РНФ N 21-77-30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта» (2021-2024 гг.).*

### **Список литературы**

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (ред. В.М. Катцов и С.М. Семенов), Москва, «Планета», 2014, 1018 с.
2. Костяной А.Г., Серых И.В., Щеглов М.А., Карелов А.И., Василейский А.С. (2017) Влияние регионального изменения климата на инфраструктуру и работоспособность железнодорожного транспорта. – Труды Шестой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и



- математическое моделирование» (ИСУЖТ-2017), 16 ноября 2017 г., Москва, АО «НИИАС», С. 147-151.
3. Мировой опыт по строительству, содержанию и ремонту объектов железнодорожной инфраструктуры в условиях многолетнемёрзлых грунтов. Центр научно-технической информации и библиотек, 2017, 126 с.
  4. Andersson, E., Häggström, J., Sima, M., and Stichel, S. (2004). Assessment of train-overturning risk due to strong cross-winds. *Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 218(3):213–223. DOI: 10.1243/0954409042389382.
  5. Baker, C.J., Chapman, L., Quinn, A. and Dobney, K. (2009). Climate change and the railway industry: a review [online]. Available from: <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1243/09544062JMES1558> [Accessed 20 September 2017].
  6. Baker, C.J., Lopez-Calleja, F., Jones, J., and Munday, J. (2004). Measurements of the cross wind forces on trains. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 92:547–563.
  7. Diedrichs, B., Sima, M., Orellano, A., and Tengstrand, H. (2007). Crosswind stability of a high-speed train on a high embankment. *Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 221(2):205–225. DOI: 10.1243/0954409JRRT126.
  8. Dobney, K., Baker, C.J., Quinn, A.D. and Chapman, L. (2009). Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom [online]. Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.114/pdf> [Accessed 20 September 2017].
  9. IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
  10. Kafalenos, R.S., and Leonard, K.J. (2008). What are the Implications of Climate Change and Variability for Gulf Coast Transportation? In: Savonis, M.J., Burkett, V.R., Potter, J.R. (Eds.), *Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase I, Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Department of Transportation, Washington, DC, USA.*
  11. Kostianaia E.A., Kostianoy A.G., Scheglov M.A., Karelov A.I., Vasileisky A.S. (2021) Impact of regional climate change on the infrastructure and operability of railway transport. – *Transport and Telecommunication*, 2021, V.22, N2, P. 183-195. DOI 10.2478/tj-2021-0014.
  12. Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Soloviev D.M., Tepe Y. On river plumes along the Turkish coast of the Black Sea. - *Ecologica Montenegrina*, 2019, 25, P. 63-78.
  13. Li, D., & Kaewunruen, S. (2019). Effect of extreme climate on topology of railway prestressed concrete sleepers. *Climate*, 7(1), 17.
  14. List of European windstorms (2020) Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_European\\_windstorms](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_European_windstorms) [Accessed 28 May 2020].
  15. Mandal N.K., Lees M. An investigation into monitoring rail stress in continuously welded rails through stress-free temperature. – *Proc. Conference on railway engineering, Melbourne Australia*, 2016.
  16. Nemry, F. and Demirel, H. (2012). Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures [online]. Available at: <http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC72217.pdf> [Accessed 20 September 2017].
  17. Rachoy, C., and Spazierer, M. (2008) Meteorological information and warning system for railway infrastructure decision support for natural hazards management. In: *Proceedings of the World Congress on Rail Research, Seoul, Korea, Paper I.3.1.1.3.* Available at: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/i.3.1.1.3.pdf> [Accessed 20 September 2017].
  18. Rail Safety and Standards Board (2003). Safety implications of weather, climate and climate change. Report prepared by AEA Technology.
  19. Rail Safety and Standards Board (2016). *Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation: Executive Report.* Available at: [www.rssb.co.uk](http://www.rssb.co.uk) [Accessed 20 September 2017].

## Межгодовая изменчивость уровня озер северо-запада России

<sup>1,2,3</sup>А.Г. Костяной, <sup>1</sup><sup>3</sup>Е.А. Костяная, <sup>3,4,5</sup>С.А. Лебедев,

<sup>1,3</sup>И.В. Серых, <sup>4</sup>Я.А. Прокофьев

*kostianou@gmail.com; sergey\_a\_lebedev@mail.ru*

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, г. Москва

<sup>2</sup>Московский университет им. С.Ю. Витте, Россия, г. Москва

<sup>3</sup>Геофизический центр РАН, Россия, г. Москва

<sup>4</sup>Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, г. Москва, г. Зеленоград

<sup>5</sup>Майкопский государственный технологический университет, Россия, г. Майкоп

**Резюме: Аннотация.** Региональное изменение климата отражается на состоянии внутренних водоемов и, прежде всего, на их водном балансе, который определяется рядом гидрометеорологических и гидрогеологических факторов. Интегральной характеристикой изменения водного баланса является поведение уровня озер и водохранилищ, который не только во многом определяет физическое и экологическое состояние водоемов, но и существенно влияет на прибрежную инфраструктуру и социально-экономическое развитие региона. В работе исследуется межгодовая изменчивость уровня 4 наиболее крупных озер северо-запада России по данным спутниковой альтиметрии за 1993-2020 гг.

**Ключевые слова.** Ладожское озеро, Онежское озеро, Псковско-Чудское озеро, озеро Ильмень, региональное изменение климата, уровень озер, северо-запад России, спутниковая альтиметрия.

### Введение

Состояние озер, водохранилищ и внутренних морей является важным индикатором происходящих региональных климатических изменений, включая экстремальные климатические события. Изменение климатических или продолжительных погодных условий влияет на состояние и изменчивость природных параметров внутренних водоемов: уровень воды, температуры воды, соленость воды, вертикальную стратификацию вод, течения, фронтальные зоны, апвеллинги, вихри и круговороты, ледовый покров и толщину льда, мутность вод, экосистемы, биоразнообразие, вегетацию и др.). Во всем мире многие озера находятся под угрозой высыхания и даже исчезновения (Kostianou et al., 2004; Kostianou, 2007, 2011, 2013, 2020).

Озера входят в список из 54 основных климатических переменных (ECV) Глобальной Системы Наблюдений за Климатом (GCOS), которые вносят решающий вклад в характеристику климата Земли (GOSIC, 2021). Уровень воды, площадь озера, температура поверхности озера, площадь и толщина льда, а также цвет воды озер являются ключевыми параметрами Глобальной наземной сети озер (GTN-L), которая фокусируется на биоразнообразии, изменении климата и устойчивом развитии. Важнейшей физической характеристикой состояния озер является уровень воды, который

измеряется in-situ на уровнемерных постах и дистанционно с помощью спутниковой альтиметрии, при этом уровень воды в озерах требуется измерять ежедневно и с точностью не хуже 3 см (GOSIC, 2021).

Ладожское, Онежское, Псковско-Чудское озера и озеро Ильмень являются крупнейшими озерами не только северо-запада России (рис.1), но и всей Европы (табл. 1).

Таблица 1

Физико-географические параметры крупнейших озер Северо-Запада России

Параметр	Ладожское озеро	Онежское озеро	Озеро Ильмень	Псковско-Чудское озеро
Водосборный бассейн (км <sup>2</sup> )	276 000	66 284	67 200	47 800
Максимальная длина (км)	219	245.0	40	152
Максимальная ширина (км)	138	91.6	32	47
Площадь поверхности (км <sup>2</sup> )	17 800	9 720.0	982	3 555
Средняя глубина (м)	5	30.0	4.4	7.1
Максимальная глубина (м)	230	127.0	10	15.3
Объем воды (км <sup>3</sup> )	837	285.0	12	25

Первые исследования этих озер с помощью спутниковой альтиметрии были выполнены в работах (Kostianou et al., 2012; Lebedev et al., 2014a,b). Согласно полученным результатам (Lebedev et al., 2014a,b), временная изменчивость уровней озер Ильмень, Ладожского и Псковско-Чудского характеризуется волной с периодом 4–5 лет, а уровень Онежского озера - волной с периодом 15 лет. В период с 1993 по 2011 г. уровень озера Ильмень поднимался со скоростью  $1,17 \pm 0,95$  см/год, Ладожского озера -  $0,24 \pm 0,10$  см/год, Псковско-Чудского озера -  $1,39 \pm 0,18$  см/год и Онежского озера -  $0,18 \pm 0,09$  см/год. В данной работе межгодовая изменчивость уровня Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озера и озера Ильмень исследуется с помощью альтиметров, установленных в разные годы на спутниках Торех/Poseidon, Jason-1, Jason-2 и Jason-3 за период с 1993 г. по 2020 г.

#### Данные и методы

Для анализа уровня исследуемых озер использовались данные спутниковой альтиметрии спутников Торех/Poseidon (август 1992 г. – январь 2006 г.), Jason-1 (декабрь 2001 г. – июль 2013 г.), Jason-2 (июнь 2008 г. – октябрь 2019 г.) и Jason-3 (январь 2016 г. – по настоящее время), наземные треки которых проходили через эти озера и которые позволили получать непрерывный ряд измерений вдоль одних и тех же треков с сентября 1992 г. по настоящее время. В данном исследовании был выбран период наблюдений с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2020 г. Данные были получены из базы данных HYDROWEB Французского космического агентства (CNES) и Лаборатории по изучению геофизики и спутниковой океанографии (LEGOS) (Cretaux et al., 2011a). Данные спутниковой альтиметрии успешно использовались для исследования гидрологического режима озер и рек в Южной Америке, Африке и Сибири (Campos et al. 2001, Birkett et al. 2002, Kouraev et al. 2004, Birkett and Beckley, 2010), уровня воды в нижнем течении Волги (Лебедев, Костяной,

2005), каскада волжских водохранилищ (Троицкая и др., 2012; Troitskaya et al. 2012; 2014) и других внутренних водоемов (Berry et al. 2005). Обзор приложений спутниковой альтиметрии для мониторинга внутренних водоемов приведен в работах Calmant and Seyler (2006) и Cretaux et al. (2011b).



Рис. 1. Крупнейшие озера северо-запада России и Беломоро-Балтийский канал

### Ладожское озеро

Ладожское озеро является крупнейшим озером Европы с площадью зеркала 17,870 км<sup>2</sup>, объемом — 838 км<sup>3</sup> и наибольшей глубиной 230 м. Длина озера с юга на север — 219 км, наибольшая ширина — 125 км, средняя высота над уровнем моря — 4,84 м. Впадающие реки — Свирь, Волхов, Вуокса, Сясь, Назия и Морье (всего 35 рек), вытекающая река — Нева, которая впадает в Финский залив. Площадь водосборного бассейна — 258,600 км<sup>2</sup>. Ладога расположена в Республике Карелия и Ленинградской области и относится к бассейну Балтийского моря (Рис.1).

Средняя температура воздуха в районе Ладожского озера +3,2°C. Средняя температура самого холодного месяца (февраля) –8,8°C, самого тёплого (июля) +16,3°C. Среднее годовое количество осадков — 475 мм. Наименьшее месячное количество осадков выпадает в феврале — марте (24 мм), наибольшее — в сентябре (58 мм). Примерно 85% (3820 мм) приходной части водного баланса даёт приток речных вод, 13% (610 мм) — атмосферные осадки и 2% (90 мм) — приток подземных вод. Около 92% (4170 мм) расходной части водного баланса идёт на сток Невы и 8% (350 мм) — на

испарение с водной поверхности. Сезонная и межгодовая изменчивость водного баланса приводит к значительной изменчивости уровня Ладожского озера.

На рис.2 представлена сезонная и межгодовая изменчивость уровня Ладожского озера с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2020 г. Наименьший уровень наблюдается зимой, наибольший летом, что соответствует сезонной изменчивости осадков на водосборном бассейне. Размах сезонных колебаний варьируется в пределах 0.5-1.6 м, при этом наибольшие значения амплитуды колебаний уровня наблюдаются во время резких межгодовых изменений водного баланса. За весь период наблюдений с 1993 по 2020 г. наблюдалось 3 максимума уровня воды в озере, которые превышали отметку 5.5 м – 16 июня 1995 г. (5.56 м), 17 июня 2005 г. (5.59 м) и 15 мая 2018 г. (5.74 м). За тот же период наблюдалось 2 минимума уровня воды в озере, которые были ниже отметки 3.6 м – 17 января 2003 г. (3.46 м) и 7 марта 2015 г. (3.6 м). Максимальный размах колебаний уровня озера за 28 лет составил 2.28 м. Таким образом, достижение как максимальных отметок, так и минимальных отметок происходит с цикличностью в 10-13 лет. Характерной особенностью межгодовой изменчивости уровня является резкий подъем уровня примерно на 2 м до максимальных отметок за 2-3 года после самых минимальных отметок, и последующий неравномерный спад уровня за 8-10 лет до следующих минимальных отметок уровня (Рис.2). Если наблюдаемая периодичность сохранится, то в ближайшие 5-7 лет можно ожидать дальнейшего понижения уровня Ладожского озера еще примерно на метр относительно отметок, наблюдаемых в конце декабря 2020 г.

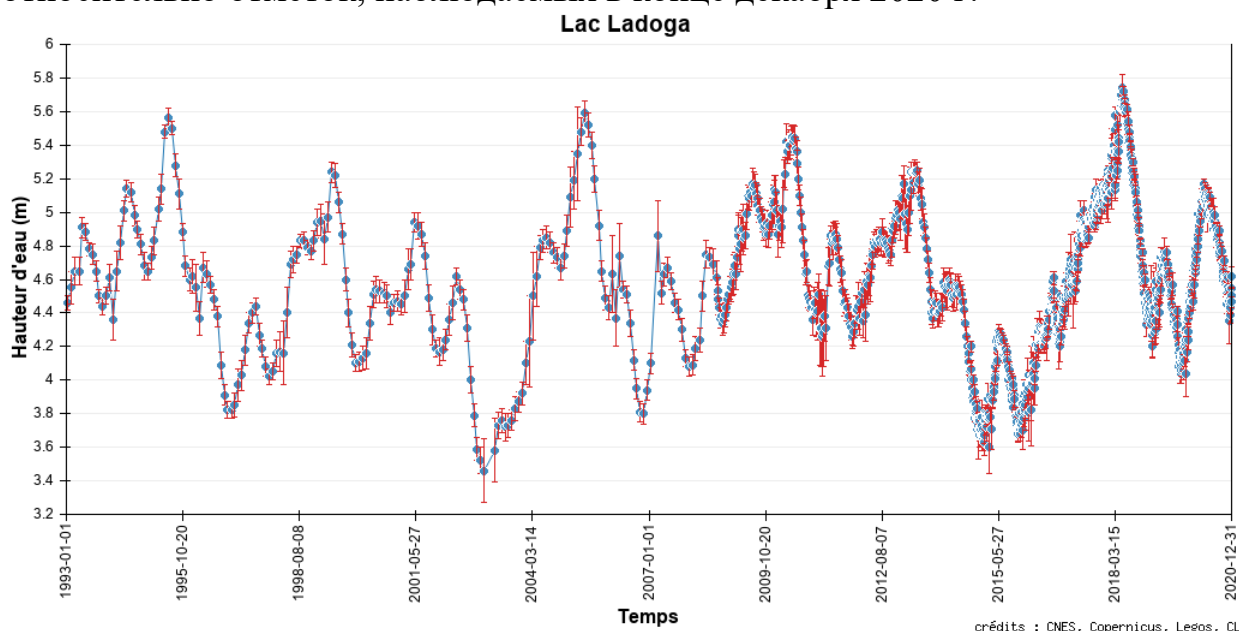


Рис. 2. Межгодовая и сезонная изменчивость уровня Ладожского озера за период с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2020 г. по данным спутниковой альтиметрии ([http://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L\\_ladoga?lang=fr&basin=NEVA](http://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L_ladoga?lang=fr&basin=NEVA))

### Онежское озеро

Онежское озеро расположено в непосредственной близости от Ладожского, но межгодовая изменчивость его уровня абсолютно не похожа на

изменчивость уровня Ладоги (Рис.3). Онежское озеро является вторым после Ладожского озером Европы с площадью зеркала 9,720 км<sup>2</sup>, объемом 285 км<sup>3</sup> и наибольшей глубиной 127 м. Длина озера с юга на север 245 км, наибольшая ширина 91.6 км, средняя высота над уровнем моря 33 м. В Онежское озеро впадают около 50 рек, а вытекает только Свирь, которая впадает в Ладожское озеро. Площадь водосборного бассейна — 66,284 км<sup>2</sup>. Онежское озеро расположено в Республике Карелия, Ленинградской и Вологодской области и относится к бассейну Балтийского моря (рис.1).

Примерно 74 % приходной части водного баланса озера (15.6 км<sup>3</sup> в год) приходится на речной сток. В озеро впадают более 1000 водотоков, из них 52 реки протяжённостью более 10 км и 8 рек — более 100 км. Самыми крупными из них являются Водла и Суна. Около 25 % приходится на атмосферные осадки и около 1% на подземные воды. Около 84% расходной части водного баланса приходится на сток из озера по реке Свирь (в среднем 17.6 км<sup>3</sup> в год) и 16% на испарение с водной поверхности. Кроме того, сток из озера зарегулирован Верхне-Свирской ГЭС. Для гидрологического режима Онежского озера характерен весенний подъём воды, который продолжается 1.5—2 месяца, при годовых колебаниях уровня воды до 0.9—1 м. Наивысшие уровни воды в озере наблюдаются в июне—августе, низшие — в марте—апреле.

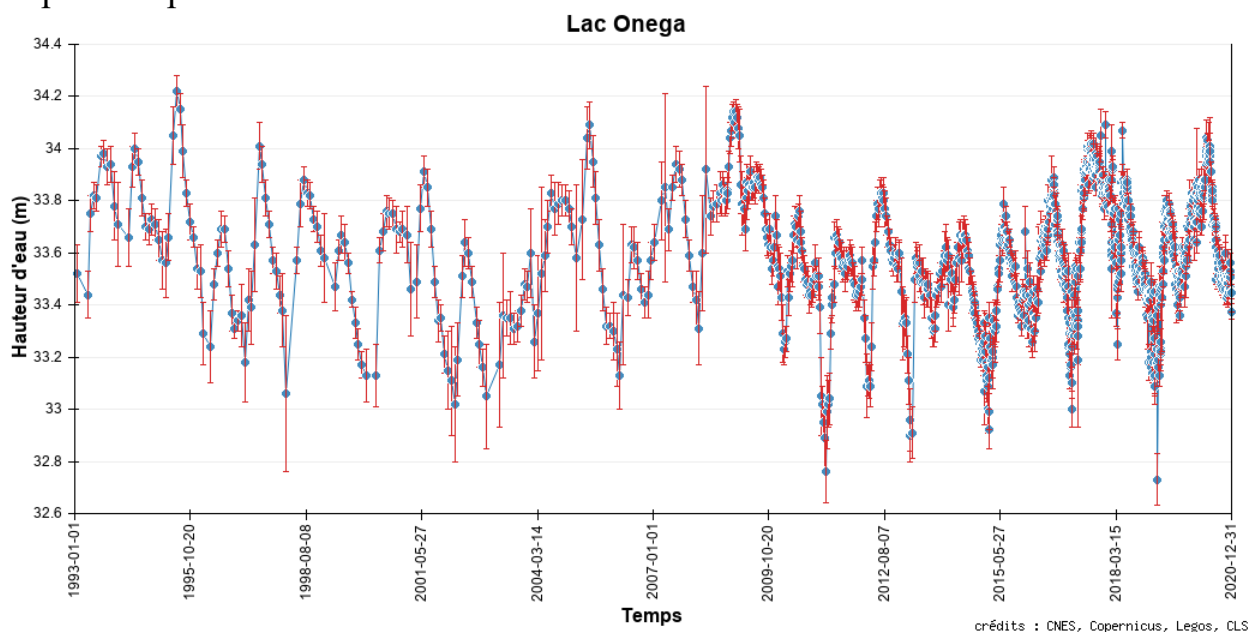


Рис. 3. Межгодовая и сезонная изменчивость уровня Онежского озера за период с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2020 г. по данным спутниковой альтиметрии ([http://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L\\_onega?lang=fr&basin=NEVA](http://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L_onega?lang=fr&basin=NEVA))

На рис.3 представлена сезонная и межгодовая изменчивость уровня Онежского озера с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2020 г. Наименьший уровень наблюдается весной, наибольший летом. Размах сезонных колебаний варьируется в пределах 0.4-1.0 м, при этом наибольшие значения амплитуды колебаний уровня наблюдаются во время резких межгодовых изменений водного баланса. Поскольку сток из озера зарегулирован Верхне-Свирской



ГЭС (максимальный расход 47 км<sup>3</sup> в год), то межгодовая изменчивость уровня Онежского озера не соответствует соседнему Ладожскому озеру. За весь период наблюдений с 1993 по 2020 г. наблюдалось 2 максимума уровня воды в озере, которые превышали отметку 34.1 м – 20 июня 1995 г. (34.22 м) и 14 декабря 2008 г. (34.14 м). За тот же период наблюдалось 2 минимума уровня воды в озере, которые были ниже отметки 32.8 м – 8 марта 2011 г. (32.76 м) и 17 марта 2019 г. (32.73 м). Максимальный размах колебаний уровня озера за 28 лет составил 1.49 м (рис.3).

### Псковско-Чудское озеро

Псковско-Чудское озеро расположено в непосредственной близости от Финского залива, на границе между Эстонией и Россией (Псковская и Ленинградская области), и относится к бассейну Балтийского моря (Рис.1). Псковско-Чудское озеро занимает четвертое место в Европе по площади после Ладожского, Онежского и Венерн (Швеция) с площадью зеркала 3,555 км<sup>2</sup>, объемом - 25 км<sup>3</sup> и наибольшей глубиной 15 м. Длина озера с юга на север - 140 км, наибольшая ширина — 50 км, средняя высота над уровнем моря - 30 м. В Псковско-Чудское озеро впадают около 30 рек, а вытекает только одна - Нарва, которая впадает в Финский залив. Площадь водосборного бассейна - 56,100 км<sup>2</sup>. Озёрный комплекс состоит из трёх частей: северное - Чудское озеро (площадь 2611 км<sup>2</sup> или 73 %), южное - Псковское озеро (708 км<sup>2</sup> или 20 %) и срединное - Тёплое озеро (236 км<sup>2</sup> или 7 %). Приходная часть водного баланса состоит из речного стока (11.2 км<sup>3</sup> или 3390 мм уровня) и атмосферных осадков (1.9 км<sup>3</sup> или 560 мм), расходная часть – сток Нарвы (12 км<sup>3</sup> или 3390 мм) и испарение с поверхности озера (1.1 км<sup>3</sup> или 320 мм).

На рис.4 представлена сезонная и межгодовая изменчивость уровня Псковско-Чудского озера с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2020 г.

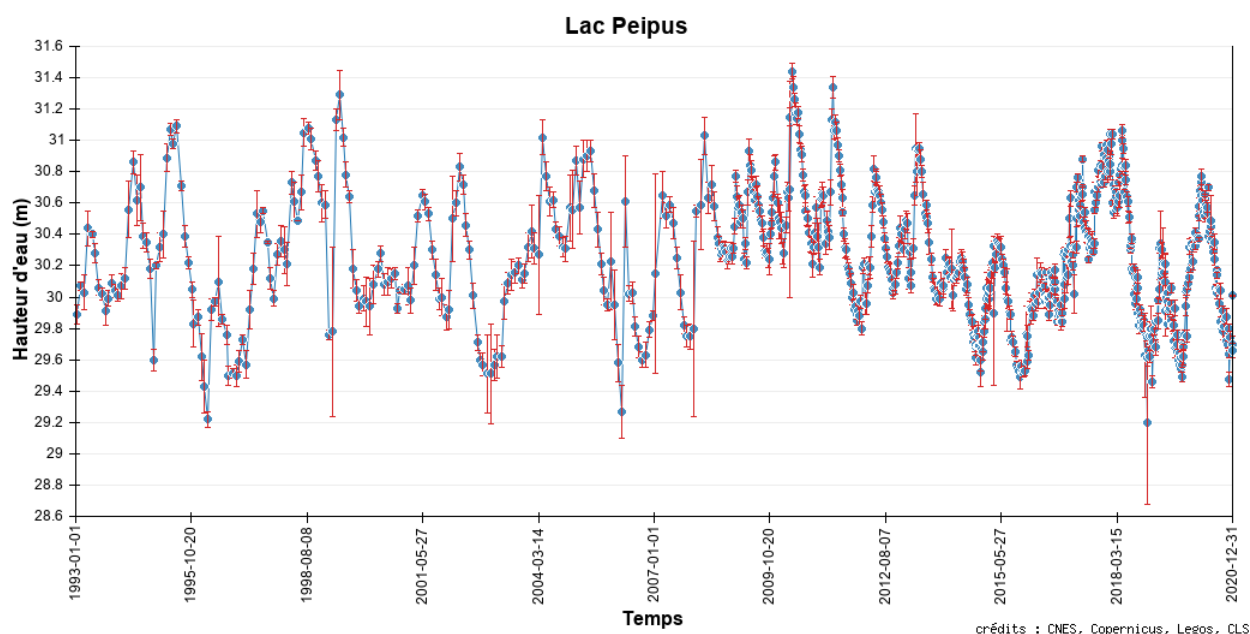


Рис. 4. Межгодовая и сезонная изменчивость уровня Псковско-Чудского озера за период с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2020 г. по данным спутниковой альтиметрии ([http://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L\\_peipus?lang=fr&basin=NARVA#](http://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L_peipus?lang=fr&basin=NARVA#))

Наименьший уровень наблюдается зимой, наибольший – в мае-июне. Размах сезонных колебаний варьируется в пределах 0.4-1.5 м, при этом наибольшие значения амплитуды колебаний уровня наблюдаются во время резких межгодовых изменений водного баланса. За весь период наблюдений с 1993 по 2020 г. наблюдалось 3 максимума уровня воды в озере, которые превышали отметку 31.2 м – 23 мая 1999 г. (31.29 м), 9 мая 2010 г. (31.44 м) и 1 мая 2011 г. (31.34 м). За тот же период наблюдалось 3 минимума уровня воды в озере, которые были ниже отметки 29.3 м – 17 марта 1996 г. (29.22 м), 17 марта 2006 г. (29.27 м) и 5 декабря 2018 г. (29.20 м). Максимальный размах колебаний уровня озера за 28 лет составил 2.24 м (рис.4).

### Озеро Ильмень

Озеро Ильмень расположено в западной части Новгородской области и относится к бассейну Балтийского моря (рис.1). Площадь зеркала — 982 км<sup>2</sup> (в зависимости от уровня воды, меняется от 733 до 2090 км<sup>2</sup>), объем — 2.85 км<sup>3</sup>, наибольшая глубина — 10 м, размеры — 45 км x 35 км, средняя высота над уровнем моря — 19 м. В озеро впадают около 50 рек, наиболее крупные - Мста, Пола, Ловать с Полистью, Шелонь с Мшагой, Веронда, Веряжа, а вытекает только одна — Волхов, впадающая в Ладожское озеро. Площадь водосборного бассейна — 67,200 км<sup>2</sup>. Колебания уровня могут достигать 7,4 м (минимальный — в марте, максимальный — в мае).

На рис.5 представлена сезонная и межгодовая изменчивость уровня Псковско-Чудского озера с 1 января 1996 г. по 31 декабря 2020 г.

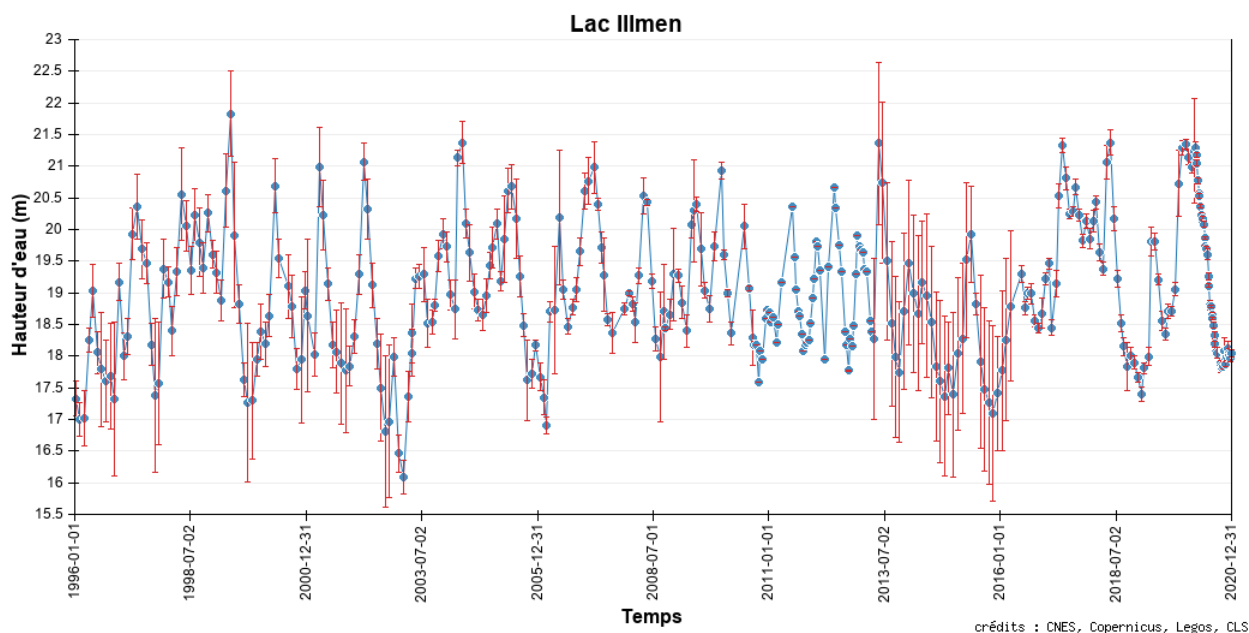


Рис.5. Межгодовая и сезонная изменчивость уровня озера Ильмень за период с 1 января 1996 г. по 31 декабря 2020 г. по данным спутниковой альтиметрии ([http://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L\\_illmen?lang=fr&basin=NEVA#](http://hydroweb.theia-land.fr/hydroweb/view/L_illmen?lang=fr&basin=NEVA#))

Размах сезонных колебаний варьируется в пределах от 2 до 5 м, при этом наибольшие значения амплитуды колебаний уровня наблюдаются во время резких межгодовых изменений водного баланса озера. За весь период



наблюдений с 1996 по 2020 г. наблюдалось 7 максимумов уровня воды в озере, которые превышали отметку 21.3 м – 13 мая 1999 г. (21.83 м), 15 мая 2004 г. (21.37 м), 14 мая 2013 г. (21.36 м), 7 мая 2017 г. (21.33 м), 20 мая 2018 г. (21.37 м), 3 января 2020 г. (21.35 м) и 25 марта 2020 г. (21.30 м). За тот же период наблюдалось 3 минимума уровня воды в озере, которые были ниже отметки 17.0 м – 18 сентября 2002 г. (16.81 м), 5 февраля 2003 г. (16.09 м) и 11 марта 2006 г. (16.91 м). Максимальный размах колебаний уровня озера за 25 лет составил 5.74 м (рис.5).

### **Заключение**

Проведенные исследования межгодовой изменчивости уровня Ладожского, Онежского и Псковско-Чудского озера за 28 лет (1993-2020 гг.) и озера Ильмень за 25 лет (1996-2020 гг.) показали, что размах межгодовых колебаний составляет 2.28 м, 1.49 м, 2.24 м и 5.74 м, соответственно. Такие значительные межгодовые колебания уровня этих озер с учетом ожидаемых изменений регионального климата могут привести к подтоплению автомобильных и железных дорог и соответствующей инфраструктуры (мостов, насыпей, линий электропередач и пр.) (Костяной и др., 2017; Kostianaia et al., 2021). В районе Ладожского озера следует обратить внимание на северо-восточное побережье озера в районе населенных пунктов Тулокса, Видлица, Салми, Питкяранта, Сортавала и озера Каркумлампи. В районе Онежского озера это – северо-западная часть его побережья, в районе населенных пунктов Шуя, Янишполе, Кондопога и Кедр озера. Поскольку сток из Онежского озера зарегулирован Верхне-Свирской ГЭС, то его уровень можно поддерживать на безопасном уровне с помощью этого гидротехнического сооружения. Именно благодаря ГЭС размах межгодовых колебаний Онежского озера составляет всего 1.5 м.

Необходимо проведение дальнейших исследований уровня Ладожского и Онежского озер, озер Карелии, выявление тенденций и цикличности их изменчивости, и взаимосвязей с климатическими изменениями температуры воздуха, атмосферных осадков и снежного покрова. Это позволит дать прогноз устойчивого развития и безопасного функционирования инфраструктуры железнодорожного транспорта в Карелии и Мурманской области.

*Исследование выполнено в рамках проекта РНФ N 21-77-30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта» (2021-2024 гг.).*

### **Список литературы**

1. Костяной А.Г., Серых И.В., Щеглов М.А., Карелов А.И., Василейский А.С. (2017) Влияние регионального изменения климата на инфраструктуру и работоспособность железнодорожного транспорта. – Труды Шестой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (ИСУЖТ-2017), 16 ноября 2017 г., Москва, АО «НИИАС», С. 147-151.
2. Лебедев С.А., Костяной А.Г. (2005) Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. Москва, изд-во «Море», 366 с.

3. Троицкая Ю.И., Рыбушкина Г.В., Соустова И.А., Баландина Г.Н., Лебедев С.А., Костяной А.Г., Панютин А.А., Филина Л.В. (2012) Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов // Водные ресурсы. Т. 39. № 2. С. 169–185.
4. Berry, P.A.M., et al. (2005) Global inland water monitoring from multimission altimetry. - *Geophys. Res. Lett.* 32(16), L16401. doi: 10.1029/2005GL022814.
5. Birkett, C.M. and Beckley, B. (2010) Investigating the performance of the Jason-2/OSTM radar altimeter over lakes and reservoirs. *Marine Geodesy* 33(1), 204–238. doi: 10.1080/01490419.2010.488983.
6. Birkett, C.M., et al. (2002) Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry. *J. Geophys. Res.*, 107(D12), 8059,. doi: 10.1029/2001JD000609
7. Calmant, S. and Seyler, F. (2006) Continental surface waters from satellite altimetry. *Geosciences C.R.*, 338, 1113–1122.
8. Campos, I.O., et al. (2001) Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon basin. *Earth and Planetary Sciences* 333(10), 633–643. doi: 10.1016/S1251-8050(01)01688-3
9. Cretaux J-F., Jelinski W., Calmant S., et al. (2011a) SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data, *Advances in space Research*, 47, 1497-1507.
10. Cretaux, J.-F.; et al. (2011b) Lakes studies from satellite altimetry. - In: *Coastal Altimetry* (ed. by S. Vignudelli, et al.), 509–534. Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-12796-0\_19.
11. GOSIC (2021) (<https://www.ncdc.noaa.gov/gosic>)
12. Kostianaia E.A., Kostianoy A.G., Scheglov M.A., Karelov A.I., Vasileisky A.S. (2021) Impact of regional climate change on the infrastructure and operability of railway transport. – *Transport and Telecommunication*, 2021, V.22, N2 (in press).
13. Kostianoy A.G. (2007) Dead and Dying Seas. – In: *Encyclopedia of Water Science*. DOI: 10.1081/E-EWS-120042068. Taylor & Francis, P.1-3.
14. Kostianoy A.G. (2011) Seas: Dead and Dying. – In: *Encyclopedia of Water Science*, Second Edition. DOI: 10.1081/E-EWS2-120042068. Taylor & Francis, P.1029-1031.
15. Kostianoy A.G. (2013) Inland seas and lakes: Central Asia case study. – In: *Encyclopedia of Environmental Management*, (Ed.) S.E. Jorgensen, Taylor & Francis, New York, V.II, P.1460-1467.
16. Kostianoy A.G. (2020) Inland Seas and Lakes: Central Asia Case Study. – In: *Environmental Management Handbook, Second Edition, Vol.4: Managing Water Resources and Hydrological Systems*, (Eds) Brian D. Fath and Sven E. Jorgensen, Taylor and Francis, CRC Press, P.337-348. <https://doi.org/10.1201/9781003045045-36>.
17. Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Kazmina M.V., Tsepelev V.Yu., Varlashina V.M., Neschadimova T.G. (2012) Satellite Monitoring of Transboundary Waters of Russia and Estonia. Moscow, Signal, 16 pp. (in Russian and English).
18. Kostianoy A.G., Zavialov P.O., Lebedev S.A. (2004) What do we know about dead, dying and endangered lakes and seas? – In: “Dying and Dead Seas. Climatic versus Anthropic Causes.”, J.C.J. Nihoul, P.O. Zavialov, Ph.P. Micklin (Eds.), NATO ARW/ASI Series, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, P.1-48.
19. Kouraev, A.V., et al. (2004) Ob’ river discharge from TOPEX/Poseidon satellite altimetry (1992–2002). *Remote Sens. Environ.* 93(1-2), 238–245. doi: 10.1016/j.rse.2004.07.007.
20. Lebedev S.A., Troitskaya Yu.I., Rybushkina G.V., Dobrovolsky M.N. (2014a) Satellite altimetry of large lakes of the Baltic Basin //2014 IEEE/OES Baltic International Symposium (BALTIC). IEEE, P. 1-5. DOI: 10.1109/BALTIC.2014.6887880.
21. Lebedev S.A., Troitskaya Yu.I., Rybushkina G.V., Dobrovolsky M.N. (2014b) Interannual variability of the lake levels in northwest Russia based on satellite altimetry // *Complex Interfaces Under Change: Sea – River – Groundwater – Lake*. Proceedings of HP2/HP3, IAHS-

IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013. IAHS Publ. Vol. 365. P. 91–97. doi: 10.5194/piahs-365-91-2015.

22. Troitskaya, Yu., Rybushkina G., Soustova I., Balandina G., Lebedev S., Kostianoy A. (2012) Adaptive retracking of Jason-1 altimetry data for inland waters: the example of the Gorky Reservoir. // *Int. J. Remote Sens.* 33, 7559–7578.

23. Troitskaya Yu., Rybushkina G., Soustova I., Lebedev S. (2014) Adaptive Retracking of Jason-1, 2 Satellite Altimetry Data for the Volga River Reservoirs // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* V.7. N5. P. 1603–1608. doi: 10.1109/JSTARS.2013.2267092.

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА РЕЧНОГО БАССЕЙНА КАК МЕТОД ОЗДОРОВЛЕНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

И.Е. Курбатова

*irenkurb@yandex.ru*

*Институт водных проблем РАН, Россия, г. Москва*

**Аннотация.** Рассмотрена средоформирующая роль экологического каркаса водосбора при организации мероприятий по улучшению состояния его территории и восстановлению процессов саморегуляции водных объектов. Сформулированы задачи космического мониторинга экологического каркаса и оценены информационные возможности спутниковой информации. Разработаны рекомендации по реконструкции элементов экологического каркаса на примере пилотного водосбора реки Дойбица – правого притока Иваньковского водохранилища. Результаты представлены в виде тематических карт.

**Ключевые слова.** Водосбор, приемный водоем, экологический каркас, реконструкция, качество воды, космическая информация.

**Abstract.** *There is considered the environment-forming role of the ecological framework of the catchment area in the organization of measures to improve its territory condition and to restore the processes of water body self-regulation. The tasks of space monitoring of the ecological framework are formulated, and the information capabilities of satellite information are estimated. Recommendations were developed to reconstruct ecological frame elements on the example of the Doybitsa River catchment area. (The river is the right tributary of the Ivan'kovskoye reservoir). The results of the study are presented to be thematic maps.*

**Keywords.** *Catchment, receiving pond, ecological framework, restoration, water quality, space information, maps.*

## Введение

Постоянно увеличивающийся рост антропогенных воздействий на водные экосистемы приводит к снижению их самоочищающей способности ухудшению их состояния. Проблема сохранения чистой пресной воды актуальна для большинства стран. Загрязнение пресной воды промышленными выбросами, городскими стоками, смывом удобрений с полей и пр. значительно снижает существующие ресурсы.

К числу традиционных мер, направленных на сохранение чистой воды, относятся: полноценная очистка всех видов сточных вод, внедрение водосберегающих технологий, замкнутый цикл использования воды и другие, не менее затратные способы, требующие серьезных технологических перестроек в промышленности и сельском хозяйстве и на которые очень неохотно идут производители. К другим направлениям сохранения водных ресурсов относятся восстановление и защита природных экосистем. Большая часть территорий, особенно в густонаселенных хозяйственных районах, практически лишилась естественных природных комплексов, поэтому проблемы территориально-экологической оптимизации природопользования

становятся все более актуальными. В последние годы идея воссоздания экологического каркаса территории все чаще рассматривается географами как альтернатива исторически сложившимся методам природопользования [1, 2, 4, 8, 12].

### **Методы**

По определению Н.Ф. Реймерса [9], природный каркас (природоохранный, экологический) есть «ранжированная по степени экологического значения система переходящих друг в друга участков природы, неразрывная взаимосвязь которых создает предпосылки для формирования естественного экологического равновесия, способного противостоять антропогенным воздействиям». Природный каркас поддерживает экологическую стабильность территории и предотвращает потерю биоразнообразия и деградацию ландшафта. Создание экологического каркаса (ЭК) предполагает минимальную перестройку существующих структур, одновременно снижая антропогенную нагрузку, усиливая эффективность управления и сокращая экономические и временные затраты [2, 12].

Вопрос выбора территории для формирования ЭК относится к числу основных. Для разработки ЭК чаще всего выбирается территориальный подход, охватывающий целые страны (панъевропейская экологическая сеть [11]), различные административные территории и др. [8, 12]. Такой тип пространственной локализации, безусловно, имеет право на существование, но относится к числу формальных, поскольку природа признает только естественные границы, к числу которых, в первую очередь, относятся водораздельные. В последние годы исследователи все чаще при решении задач водопользования обращаются к бассейновому типу пространственной локализации, с которым связаны основные представления гидрологии суши и других естественных наук. Водосборы (или бассейны) являются одним из естественных, целостных и иерархически организованных природных образований, в котором замыкаются многие виды круговорота веществ [3].

Основной целью проводимых исследований является поиск методических подходов к улучшению экологического состояния рек. Поскольку «здоровье» приемного водоема зависит от благополучия экологического состояния его водосбора, то выбор речного бассейна в качестве территории для формирования ЭК является оптимальным. Водосбор имеет четкие орографические границы, что правомерно позволяет его считать и таксономической и расчетной единицей. Внедрение бассейнового принципа управления природными комплексами включено в число основных задач Региональной политики РФ в области экологии [13]. В последние годы реконструкция экологического каркаса водосбора (ЭКВ) на территориях, оказывающих загрязняющее воздействие на водные объекты, стала одним из методов разработки экологически эффективной практики хозяйствования [1, 5], базирующейся на природном механизме биологической очистки стоков.

Применительно к речным водосборам ЭК – это взаимосвязанная пространственно организованная структура гидрографической сети водосбора

и всех сохранившихся внутри него участков естественных ландшафтов, урочищ, водно-болотных угодий и др. объектов с различными режимами природопользования, выполняющих основные средообразующие и средозащитные функции. Структура ЭКВ любого иерархического уровня представляет собой пространственное распределение площадных (в виде ядер и узлов) и линейных составляющих (коммуникативных коридоров), которые в границах конкретного водосбора поддерживают экологическую стабильность территории, предотвращают потерю биоразнообразия и деградацию ландшафтов, способствуя тем самым сохранению и улучшению качества водных ресурсов [5]. Функции элементов ЭКВ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные структурные элементы ЭКВ и их функции [5]

<i>Элементы</i>	<i>Виды объектов</i>	<i>Основные функции</i>
<b>Ядра</b>	Заповедники, заказники, национальные парки, лесные массивы, дельтовые области, крупные водоемы, системы озер, водно-болотные угодья и др.	Выполнение средоформирующих функций. Сохранение эталонных природных комплексов в неизменном виде, поддержание ландшафтного биоразнообразия
<b>Коммуникативные коридоры</b>	Речная сеть, долины рек, старицы, водораздельные леса, овражно-балочные, пойменные и террасные полосы зональной растительности, лесополосы различного назначения.	Выполнение транспортных функций. Поддержание целостности каркаса за счет соединения разрозненных ядер, обеспечение беспрепятственного перемещения подвижных компонентов среды.
<b>Буферные зоны</b>	Буферные зоны заповедников, заказников, лесов водоохранные, санитарно-защитные зоны водохранилищ, рек и их истоков, зеленые зоны населенных пунктов (сады, парки и т.д.)	Выполнение средозащитной роли, уменьшение остроты антропогенного воздействия за счет ограничения хозяйственной деятельности.
<b>Сетевые узлы</b>	Пересечения рек, речных долин с лесополосами, колками леса, заболоченными понижениями и др.	Локальные средоформирующие функции. Образование мини-ядер разной степени сохранности, перспективных для восстановления опорных узлов сети каркаса
<b>Локальные (очаговые) формы</b>	Памятники природы, фрагментарные участки леса, небольшие озера и пруды, луга, сенокосы, небольшие ложбины, балки и др.	Местные очаги ненарушенной (слабонарушенной) природы, перспективные при реконструкции сети каркаса.

В настоящее время не существует правового статуса ЭКВ, единой системы управления, наблюдения и контроля над состоянием его элементов [2]. В связи с этим одной из первостепенных задач является разработка комплексного мониторинга, с помощью которого может осуществляться выявление структурных элементов ЭКВ и наблюдение за их состоянием. В условиях дефицита данных наземных наблюдений и сокращения полевых работ важной составной частью информационной базы мониторинга являются картографические и дистанционные материалы [6].

На первом этапе работ по базовым топографическим картам определяется местоположение водораздельных границ, проводится анализ строения гидрографической сети, наличия природных и антропогенных объектов, влияющих на состояние водосбора, выделяются элементы ЭКВ на дату составления карты. Масштаб карты определяется размерами водосбора.

На втором этапе работ привлекаются материалы космической съемки для обновления карты, определяется современное состояние элементов ЭКВ (рис. 1). Сравнительный анализ космических материалов с топографическими картами показывает большую, чем на картах, детальность изображения подстилающей поверхности [6]. Особенно эффективно их применение для распознавания границ и структур ядер и линейных транспортных коридоров. ГИС - технологии позволяют оценить изменения структурных элементов ЭКВ за период, прошедший с момента создания карты до даты космической съемки, отображая современные границы лесных массивов, лесополос, сельскохозяйугодий и их состояние (используемые, зарастающие, заросшие).



Рис. 1. Основные элементы экологического каркаса (фрагмент водосбора р. Сейм): ядра разной значимости – 1; коммуникативные коридоры: речная сеть – 2, овражно-балочные системы – 2а, защитные лесополосы – 2б; буферные зоны – 3; локальные узлы (места пересечения коридоров) – 4; прочие земли: пашни – 5; бедленды – 6 (Google maps, архив)

По изображениям выявляются участки, перспективные для восстановления сети ЭК, а также для идентификации объектов, являющихся источниками точечных или диффузных загрязнений поверхностных вод [6]. Основные этапы и задачи мониторинга ЭКВ представлены на рис. 2.

Разработка проекта реконструкции ЭКВ может быть использована в программах по улучшению экологического состояния, как самой территории, так и гидрологической сети. Проект включает расширение площадей природоохранных и буферных зон, формирование зеленых зон вокруг населенных пунктов, водоемов, проведение работ по восстановлению лесов и насаждению новых защитных лесополос вдоль транспортных сетей и пашен, облесение и залужение прибрежных защитных полос, рекультивация бедлендов, заброшенных пашен, выбитых пастбищ.



Рис. 2. Структура и последовательность постановки основных задач мониторинга экологического каркаса водосбора [6]

Реконструкция ЭКВ направлена на укрепление экологической сети, а, следовательно, улучшение состояния водосбора, качества его поверхностных вод и приемного водоема за счет формирования естественных барьеров для защиты природных комплексов от антропогенных воздействий. Постепенное ослабление негативного влияния хозяйственных объектов приведет к уменьшению объема диффузных загрязнений, поступающих в почвы и поверхностные воды от разных источников. Все эти мероприятия положительно скажутся на качестве водных объектов, повысят их способность к самоочищению, могут быть использованы совместно с другими методами оздоровления приемных водоемов.

### Результаты

Практическая реализация разработанной методики была осуществлена на примере реки Дойбица - правого притока Иваньковского водохранилища



Длина реки 24 км, площадь водосбора – 192 км<sup>2</sup> [10]. Река Дойбица используется в хозяйстве Завидовского и Мокшинского сельских округов для водоснабжения, любительского рыболовства и рекреации. Антропогенную нагрузку р. Дойбица испытывает на всем протяжении. Вдоль реки - массивы населенных пунктов и садовых участков, железнодорожные пути и автомобильные трассы Москва-Санкт-Петербург, промышленные предприятия, пашни и животноводческие комплексы, земли туристическо-рекреационной зоны («Редисон-Завидово» и др.) Эти объекты являются основными источниками загрязнений реки (рис.3).



Рис.3. Антропогенная нагрузка на водосбор р. Дойбицы: а – крупный туристический комплекс «Редисон-Завидово» в устье реки; б – крупнейший в Европе стекольный завод ООО «AGC Flat Glass»; в – участки торфоразработок; г – животноводческий комплекс (спутниковые изображения из архива Google maps)

Современное состояние ЭКВ р. Дойбица представлено двумя крупными ядрами - особо охраняемыми природными территориями: национальным парком федерального значения «Государственный комплекс «Завидово» (площадь участка в пределах водосбора Дойбицы 1380 га, что составляет 7,1% от его площади) и государственным природным заказником регионального значения «Леса западной части Борщевского лесничества» (площадь 181 га, 0,9% от площади водосбора). Обширные пространства заняты лесами, которые выполняют сразу несколько функций (средообразующую, средозащитную и транспортную). Коммуникативная функция принадлежит рекам Дойбица и

Ведома, их притокам, локальным участкам лесополос вдоль дорог и пашен. Современное состояние природных объектов, составляющих основу ЭКВ, изучено с помощью космических изображений и представлено в виде тематической карты масштаба 1:100 000 (рис. 4).

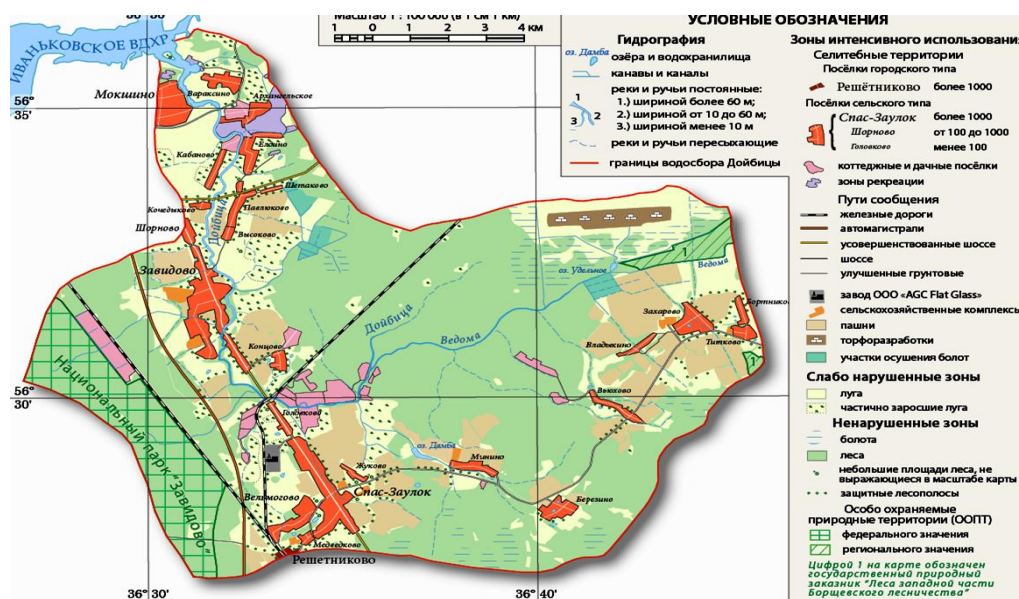


Рис. 4. Современное состояние элементов экологического каркаса водосбора

На диаграмме (рис.5) показана структура земель ЭКВ р. Дойбицы, на которой хорошо видно, что крупные лесные массивы занимают почти половину площади всего ЭКВ, а вместе с ООПТ, защитными лесами и лесополосами – почти две трети площади. Экологический каркас территории водосбора занимает примерно 79,6 % площади его территории.



Рис. 5. Структура земель экологического каркаса водосбора р. Дойбицы, их доля в % от площади ЭКВ

На первый взгляд, ситуация вполне благополучная. Однако, специфика строения ЭКВ Дойбицы заключается в разделении лесных территорий на два крупных массива сплошной безлесой полосой шириной от 4 до 6 км вдоль русла реки (рис. 5). В этой полосе сосредоточены селитебные, сельскохозяйственные промышленные и транспортные территории – основные источники площадных диффузных загрязнений, которые поступают в реку и ее притоки.

Рекомендации по укреплению сети ЭКВ в зависимости от ландшафтных условий и видов антропогенной нарушенности включают:

- Установление мест разрывов сети ЭКВ, оценка ее фрагментарности как показателя неустойчивости системы;
- Выявление территорий, пригодных к экологической реставрации для воссоздания целостной инфраструктуры ЭКВ;
- Классификация природных и антропогенных объектов по степени сложности рекультивации;
- Определение оптимальных мест для создания дополнительных элементов экологического каркаса;
- Выбор вариантов соединения разрозненных элементов ЭКВ

На основе пространственного анализа современного состояния местности были определены наиболее оптимальные места создания искусственных элементов для проектирования территориально взаимосвязанной системы экологического каркаса (рис. 6). В местах разрыва природного каркаса в целях восстановления его единой структуры создаются искусственные элементы ЭКВ. Ключевые предлагаемые мероприятия по улучшению экологического состояния заключаются в увеличении площади леса за счёт сооружения дополнительных лесополос вдоль населенных пунктов, асфальтированных путей сообщения, территорий промышленных и сельскохозяйственных предприятий, а также залесения частично заросших малоиспользуемых земель. Увеличение площади лесов производится в основном за счёт земель щадящего природопользования. Потенциальные возможности сокращения объема диффузных загрязнений можно определить, используя экспертные оценки поступления загрязнений с сельскохозяйственных угодий, транспортных магистралей, промышленных объектов, сельских и дачных поселений (не имеющих канализации). Основной объем диффузных загрязнений с территорий центральной части водосбора поступает в воды р. Дойбицы, а затем и в Ивановское водохранилище. Задача реконструкции ЭК такого водосбора с компактной линейно распределенной антропогенной нагрузкой состоит в соединении крупных боковых лесных массивов за счет создания коммуникативных коридоров вдоль транспортных магистралей, лесозащитных полос и зеленых зон вокруг населенных пунктов. Увеличение площади зеленых насаждений вокруг населенных пунктов, за счет некоторого сокращения пахотных земель и создания лесополос будет способствовать восстановлению средоформирующих и средозащитных функций ЭК водосбора и уменьшению объема поступления биогенных загрязняющих веществ в водные объекты.



Объем выноса диффузных загрязнений зависит от многих показателей – почвы, слоя стока, величины уклонов, фоновых значений, количества внесенных удобрений и др.



Рис. 6. Фрагмент карты «Реконструкция экологического каркаса водосбора р. Дойбица»

Натурные измерения немногочисленны. Тем не менее, в первом приближении можно определить интервал значений объема выноса биогенных веществ с различных природных поверхностей и пахотных земель, взяв за основу в качестве примера экспертные значения, приведенные Р.А. Нежиховским [28] (табл. 2). В табл. 3 приводятся результаты расчета выноса биогенных веществ практически со всей территории водосбора – 167 км<sup>2</sup> из 192-х (без учета селитебных и транспортных территорий, для которых используются другие методики расчета).

Реализация проекта восстановления экологического каркаса водосбора Дойбицы и уменьшение площади пахотных земель водосбора Дойбицы только на 10% позволит предположительно сократить вынос общего фосфора от 100 до 200 кг в год, а общего азота от 590 до 1000 кг.

Таблица 2

Количества веществ, выносимых талыми снеговыми и дождевыми водами, с территорий, занятых различными угодьями (кг/га год) [7]

Элементы ландшафта	Фосфор общий	Азот общий
Леса, болота	0,05 – 0,10	1 – 2
Луга, земли малоосвоенные	0,1 – 0,5	2 – 3
Обрабатываемые земли (пашни)	0,5 – 1,0	3 – 5

Количество биогенных веществ, выносимых талыми снеговыми и дождевыми водами с различных угодий водосбора р. Дойбицы (тонн/год)

Показатели	Площадь угодий, км <sup>2</sup>			Площадь всех типов угодий, км <sup>2</sup>	Количество выносимых веществ, тонны	
	Леса, болота	Луга, малоосвоенные земли	Обработываемые земли (пашни)		Азот общий	Фосфор общий
		98,6	49,4	19,6	167,6	25,6 - 44,3

### Заключение

Экологический каркас территории речного бассейна обеспечивает сохранение его средоформирующих, средозащитных водорегулирующих экологических функций и является основой для его устойчивого развития. Проведенное исследование по изучению экологического каркаса речного водосбора и возможностей его реализации показало многофункциональность решаемых задач.

Реконструкция экологического каркаса является одним из современных, апробированных в развитых странах эффективных и малозатратных способов оптимизации природопользования речных водосборов.

Совместное использование картографической и спутниковой информации оптимально при изучении и организации мониторинга экологического каркаса речного бассейна и разработке проектов по его реконструкции с использованием ГИС-технологий.

Предложенный алгоритм последовательных действий (при отсутствии натурных обследований) позволяет подойти к оценке возможного уменьшения годового объема выноса диффузных загрязнений дождевыми и талыми снеговыми водами с подстилающей поверхности водосбора в приемный водоем.

Данный подход может быть использован совместно с другими методами, направленными на оздоровление поверхностных вод.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания АААА – А19 – 119040990079 – 3 № 0147 – 2019 – 0004 (ИВП РАН) Минобрнауки России.*

### Список литературы

1. Воропаева Т.В. Экологический каркас речного бассейна как перспективная стратегия сохранения биоразнообразия. // Естественные и технические науки. 2010. № 6 (50). С. 376-381
2. Елизаров А.В. Экологический каркас - стратегия степного природопользования XXI века. // Степной бюллетень, 1998. - №2. С.6-12.
3. Короткий Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании: монография. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. 163 С.
4. Кулешова М.Е. Экологические каркасы // Охрана дикой природы. 1999. № 3 (14). С. 25-30.
5. Курбатова И.Е. Экологический каркас речного бассейна и его реконструкция как метод оптимизации природопользования / Государственное управление: Российская Федерация в современном мире. XII Международная конференция факультета

государственного управления МГУ имени М.В. Ломоносова, 29–31 мая 2014 г.: Материалы - М.: Инфра-М, 2015. –599-604. - Режим доступа: [Электронный ресурс] <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=514674>

6. Курбатова И.Е. Использование спутниковой информации для оценки экологического состояния водосборов ряда рек средней полосы России и разработки рекомендаций по их реабилитации / Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сборник научных трудов. М.: Студия Ф1, 2019. С.405-410.

7. Нежиховский Р.А. Гидролого-экологические основы водного хозяйства. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 230 с.

8. Пономарев А.А., Байбаков Э.И., Рубцов В.А. Экологический каркас: анализ понятий / Ученые записки Казанского университета. Естественные науки. 2012. Т.154 кн.3. С. 228-238

9. Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник, - М.: Мысль 1990. 640 с

10. Реки и озера мира. Энциклопедия. М.: ООО» Издательство» Энциклопедия», 2012. – 928 с.

11. Руководящие принципы формирования общеевропейской Экологической сети// Информационные Материалы по экологическим сетям . М., 2000. Вып. 4. М.:ЦОДП, 2000. 32 с.

12. Стоящева Н.В. Экологический каркас территории и оптимизация природопользования на юге Западной Сибири (на примере Алтайского региона). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 140 с.

13. Экологическая доктрина Российской Федерации. Распоряжение Правительства РФ от 31 августа 2002 г. № 1225-р. (Электронный ресурс) <https://jurkom74.ru/ucheba/ekologicheskaya-doktrina-rossiyskoy-federatsii>

## МОНИТОРИНГ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ БЕЛАЯ

Е.В. Кюль, Н.В. Кондратьева, М.М. Гедуева, Д.Р. Джаппуев  
*m.gyaurgieva@mail.ru*

*Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр РАН»,  
Центр географических исследований, Россия, г. Нальчик*

В последние годы горная часть северного склона Большого Кавказа хорошо осваивается, и при этом развиваются новые для данного региона ресурсозатратные отрасли хозяйства. Это приводит к тому, что наблюдается активизация практически всех типов ОПП, характер схода которых часто приобретает катастрофический характер. При этом на основе анализа ряда Кадастров [1-2], литературы по водным ресурсам [3-6], космоснимков разных лет залёта [7] и полевых исследований составлен комплект фоновых (обзорных) карт М 1: 1500 000 (изученности, освоенности и собственно подверженности территории Республики Адыгея (бассейн р. Белая) и приграничных с ней территорий Краснодарского края: впервые за последние 15 лет были проведены детальные обследования исследуемой территории по степени подверженности опасным природным процессам с учётом освоенности территории (ландшафтный анализ по типу землепользования) [8]. Для основных линейных, в частности, автодорог и площадных (населённые пункты и рекреационные объекты) хозяйственных объектов по авторской методике [9] выполнена детальная инвентаризация с применением дополнительных технических средств, что позволяет, в дальнейшем, разработать мероприятия по уменьшению уровня воздействия опасных процессов до приемлемого минимума (пикетаж аварийных участков автодорог с мостами, защитных сооружений).

**Характеристика речного бассейна (р. Белая).** Река Белая, левый приток р. Кубань, приток 1-го порядка, река в Европейской части России, в западной части Большого Кавказа, в Краснодарском крае и Республике Адыгея [3-6] (рис. 1). Истоки р. Белой находятся на высоте 2300 м на северном склоне Главного Кавказского хребта. Впадает же р.Белая в Краснодарское водохранилище, формируя дельту площадью 57 км<sup>2</sup>. Р.Белая по длине (273 км) является самым длинным притоком р.Кубань, по площади (5990 км<sup>2</sup>) – 2-м после р.Лаба. Основные притоки р.Белой: Киша и Дах (правые), Курджипс и Пшеха (левые). В верхней части (до пос. Каменноостского) русло реки представляет собой узкое ущелье, в среднем течении (до г. Майкопа) оно умеренно извилистое и слаборазветвлённое, на нижнем участке до впадения левого притока р. Пшеха, умеренно извилистое, а ниже по течению – оно меняется на очень извилистое, с большим количеством островов, песчаным ложем и низкими берегами.



Рис. 1. Гидрографическая схема района исследований. Бассейн р. Белой.

1 – Р. Белая 1-го порядка, левый приток р. Кубань

Основные притоки р. Белой (от устья против часовой стрелки):

Левые притоки 2-го порядка:

2. Р. Пшеха
3. Р. Ханка
4. Р. Курджипс (Сухой Курджипс)
5. Р. Шунтук
6. Р. Полковницкая
7. Р. Аминовка
8. Руч. Мезмайский
9. Руч. Руфабго
10. Р. Догуако
11. Р. Сибирка
12. Р. Сашкова
13. Р. Бзыха
14. Р. Хамышанка
15. Р. Липовая
16. Р. Жолобная
17. Р. Армянка
18. Р. *Светлый* (Мутный?) Тепляк

Правые притоки 2-го порядка:

19. Р. Кудо
20. Р. Малая Чура.
21. Р. Берёзовая.
22. Р. Чессу
23. Р. Молчепа
24. Р. Киша
25. Руч. Блокгаузный
26. Р. Грушевая
27. Руч. Золотой
28. Руч. Липовый
29. Р. Сюк
30. Р. Грузинка
31. Р. Дах
32. Р. Мишоко
33. Р. Средний Хаджох
34. Р. Малый Хаджох
35. Р. Фюнта
36. Р. Майкопка
37. Р. Чумная Балка

Ширина реки также варьирует от 5 м в верховьях до 50–80 м в низовьях (ниже города Белореченска). Среднемноголетний расход воды также варьирует от 29 м<sup>3</sup>/с в верховье реки до 109 м<sup>3</sup>/с выше Белореченского водохранилища и 42 м<sup>3</sup>/с (объём стока 1,33 км<sup>3</sup>/год) ниже водохранилища. Питание реки, в основном, дождевое. На реке обычно наблюдается весенне-летнее половодье (с началом в марте и окончанием в августе), а также паводки в течение всего года. При этом уровень воды может колебаться в диапазоне до 2 м. Годовой водный сток -39, 24, 16 и 21% соответственно весной, летом,



осенью и зимой. На р. Белой 3 водохранилища: Тшикское, построенное в 1940 г. вблизи устья Белой и вошедшее в 1973 г. в состав Краснодарского водохранилища; Майкопское и Белореченское, построенные соответственно в 1950 и 1954 гг.

В целом, характеристика р. Белой указывает на то, что в данном речном бассейне возможен сход таких опасных процессов, как паводки, подтопления и наводнения, реже – сели и наносоводные паводки, а также сопутствующие им такие ОПП, как оползни, обвалы и осыпи. Причём из-за наличия водохранилищ ОПП могут носить антропогенный характер.

**Результаты геоэкологического полевого мониторинга.** В результате проведения геоэкологического полевого мониторинга по основным речным бассейнам Западного Кавказа были обследованы с применением технических средств на предмет подверженности ОПП (снежные лавины, сели, оползни, обвалы, осыпи и паводки) следующие основные народно-хозяйственные объекты, а именно, в бассейне р. Белой и её 2 левых притока 2-го порядка, рек Курджипс и Пшеха (14 точек наблюдения, рис. 2): это пос. Гузерипль и участок автодороги Гузерипль-Даховская с мостами, станица Даховская и участок автодороги Даховская – турбаза «Лаго-Наки», а также участок автодороги Даховская - Майкоп; 2) по р. Курджипс - участок автодороги Красный Дагестан- Гумайка и собственно станица Нижегородская и пос. Гумайка; 3) По р. Пшеха- участок автодороги пос. Цуревский - село Черниговское. Правые притоки, в частности р. Киша, не обследовались, так как они хорошо рассмотрены на предмет лавинно-селевой деятельности при составлении Кадастра лавинно-селевой опасности Северного Кавказа в 2001 году [1] и Кадастра селевой опасности Юга европейской части России в 2015 году [2]. Обследование проводилось в зоне расположения линейных хозяйственных объектов (НХО), а именно, автодорог.



Рис. 2. Точки обследования (GPS-съемка) бассейна реки Белой в 2019 году

**Цифровое картографическое отображение результатов мониторинга.** На основе собранного материала создана цифровая картографическая основа М 1:100000 на территорию Краснодарского края и Республики Адыгея, а также по результатам паспортизации и инвентаризации ОПП Кадастры селевой и паводковой опасности на реку Белая с левыми притоками, рр. Курджипис и Пшеха. По районам исследований также подготовлены материалы для создания интерактивных карт -схем. С помощью ГИС-системы создан растровый слой (топооснова) на который следующим этапом создаются и добавляются векторные слои – границы субъектов РФ, реки, населенные пункты, дороги и т.д. Когда уже основа имеется, далее создается тематический слой, в данном случае это слой по точкам, снятым с GPS-навигатора по ОПП бассейнов рек Белая и Малая Лаба. На данном этапе сформированы основы карт-схем по регионам, где и проводились дальнейшие обследования - Республики Адыгея и Краснодарского края (рис. 3).

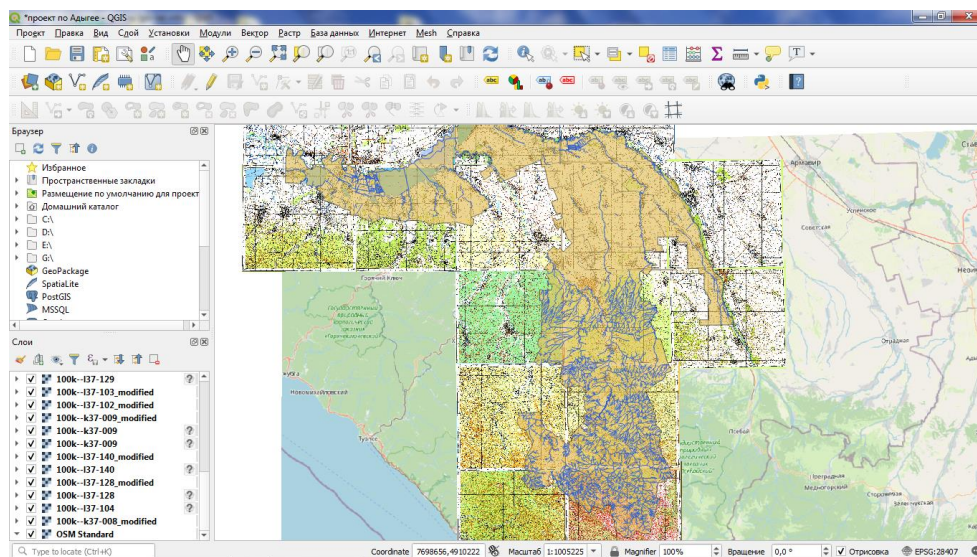


Рис. 3. Скриншот цифровой основы М 1: 200000 на территорию Краснодарского края и Республики Адыгея

В результате полевых исследований по данным мониторинга составлен Кадастр паводковой и селевой опасности бассейна р. Белая (Республика Адыгея и приграничные районы Краснодарского края) (таблица).

**Выводы.** По степени изученности исследуемая территория относится к слабо изученной (лучше изучены сели за исключением Краснодарского края). При этом по вертикали в широтном направлении с юго-запада на северо-восток степень подверженности уменьшается (в высокогорной зоне она на порядок выше, чем в среднегорной). Причём рисунок распространения меняется от простого (в высокогорной это, в основном, 1 тип ОПП) до сложного (3-4 типа ОПП) в среднегорной части. В целом, степень подверженности меняется от очень слабой и слабой соответственно в среднегорной и высокогорной зоне в Краснодарском крае и Адыгее.

Кадастр  
к карте селевой и паводковой опасности (бассейн р. Белая) по результатам мониторинга 2019 г.

№	№ по Кадастру	Но-мер по GPS-навигатору (ЦГИ)	Название водотока	Адрес селевого бассейна	Генезис селя/паводка	Максимальный объем селя, W, м³ (аналитическим методом) [Кадастр..., 2]	Дополнительные сведения	Повторяемость 1 раз в n лет/ даты схода	Тип ОПП
1	2	3	4	11	12	13	14		
1-01	-	1043	2.Р.Пишеха	л.п.р. Белая	Д	-	Угроза а/д и мосту	23.05.2019	Паводок
		1042	2.Р.Пишеха	л.п.р. Белая	Д	-	Угроза а/д и мосту	23.05.2019	Паводок
		1042	2.Р.Пишеха	л.п.р. Белая	Д	-	Угроза а/д и мосту	23.05.2019	Паводок
		1041	2.Р.Пишеха	л.п.р. Белая	Д	-	Угроза а/д и мосту	23.05.2019	Паводок
		1037	2.Р.Пишеха	л.п.р. Белая	Д	-	Ниже с. Черниговское Угроза а/д и мосту	23.05.2019	Паводок
		1038	2.Р.Цица	л.п.р. Пишеха	Д	-	Выше с. Черниговское Угроза а/д и мосту через р. Цица?	23.05.2019	Паводок. ОМ выше и ниже моста
1-02	-	-	3.Р.Ханка	л.п.р. Белая	Д	-	-	-	Не обследована
1-03	-	-	4.Р.Курджипс	л.п.р. Белая	Д	-		22.05.2019	Паводок
1-04	-	-	5.Р. Шунтук	л.п.р. Белая	Д	-	Угроза пос. Шунтук, а/д и мосту через р. Шунтук	23.05.2019	Паводок
1-05-1-08	-	-	6. Р. Полковницкая 7. Р. Аминовка 8. Руч. Мезмайский 9. Руч. Руфабго	л.п.р. Белая	Д	-	Угроза а/д и мосту через р.Полковницкая* и пос. Каменноостский*	-	Не обследована
1	?	1036	1.Р.Белая	л.п.р.Кубань	Д	-	Выше ст. Даховской	22.05.2019	Паводок. ОМ
		1035	1.Р.Белая	л.п.р.Кубань	Д	-	-	22.05.2019	Паводок
		1034	1.Р.Белая	л.п.р.Кубань	Д	-	-	22.05.2019	Паводок
1-09	1-01	1035	10.Р.Догуако(а)	л.п. р.Белая	Д	45 297	Угроза а/д ?	3-7/- 22.05.2019	Сель

1-10-1-12	-	-	11. Р. Сибирка 12. Р. Сашикова 13. Р. Бзыха	л.п.р. Белая	Д	-	-	-	Не обследована
1-13	-	-	14. Р. Хамышанка	л.п.р. Белая	Д	-	Ниже с.Хамышки Угроза а/д	22.05.2019	Паводок
1-14	-	-	15. Р. Липовая	л.п.р. Белая	Д	-	Ниже с. Хамышки	22.05.2019	Паводок
1	-	1033	1.Р.Белая	л.п.р.Кубань	Д	-	Выше устья р. Липовой Угроза а/д	22.05.2019	Паводок. ОМ
	-	1032	1.Р.Белая	л.п.р.Кубань	Д	-	Стрелка.Напротив устье р. Киша	22.05.2019	Следы селей
	-	1031	1.Р.Белая	л.п.р.Кубань	Д	-	Угроза а/д. Подпорная стенка.Склон закреплён сеткой.	22.05.2019	Паводок. ОМ и ООМ. Свежие следы схода.
	-	1030	1.Р.Белая	л.п.р.Кубань	Д	-	Угроза а/д. Поверхност- ный смыв (до 1 км). Занос а/д. Подпорная стенка.	22.05.2019	Паводок. ОМ и ООМ. Свежие следы схода.
	-	1029- 1023	1.Р.Белая	л.п.р.Кубань	Д	-	Угроза а/д. Поверхност- ный смыв. Занос а/д.	22.05.2019	Паводок. ОМ и ООМ. Свежие следы схода.
1-15	-	-	16.Р. Жолобная ?	л.п. р.Белая	Д	Более 10000(факт.)	Угроза пос. Гузерипль, СВ часть, а/д и мосту	22.05.2019	Сель
1-16	1-02	-	17.Р.Армянка	л.п. р.Мутный Тепляк или р. Белая?	Д	30 787	Угроза а/д	-/2012	Сель**. Не обследована
1-17	1-03	-	18.Светлый (Мутный) Тепляк	л.п. р.Белая	Д	30 113		-/2012	Сель**. Не обследована
1-18	1-04	-	б/н	л.п. р.Белая	Д	3 855		-/-	Паводок**. Не обследована
1	1-05	-	1.Р.Белая, верховья	л.п. р.Кубань	Д	33 415		-/-	Сель**. Не обследована
1-19-1-21	-	-	19. Р.Кудо 20. Р. Малая Чура. 21. Р. Берёзовая	п.п.р.Белая		-			Сель**. Не обследованы

1-22	1-06	-	22.Р.Чессу (верховья)	п.п. р.Белая	Л, Л- Д	43 919		-/-	Сель**. Не обследована
	1-07	-	б/н	п.п. р.Чессу	Л-Д; Д	6 637	Угроза а/д	-/-	Паводок**. Не обследована
1-23	1-08	-	Балка Федорова	п.п. р.Белая	Д	24 604	Угроза а/д	-/-	Сель**. Не обследована
1-24	1-09	-	Балка Картузовая	п.п. р.Белая	Д	16 286	Угроза а/д	-/-	Сель**. Не обследована
1-25			23.Р. Молчепа		Д				
	1-10	-	Балка Рыбья	л.п.р.Малчепа	Д	18 370		-/-	Сель**. Не обследована
	1-11	-	Безымянная балка	л.п.р.Малчепа	Д	3 231		-/-	Паводок**. Не обследована
	1-12	-	23.Р. Молчепа (верховья)	п.п. р.Белая	Л-Д, Д	12 673		-/-	Сель**. Не обследована
1-27	1-13- 1-28	-	24.Р.Киша	п.п. р.Белая	Л-Д, Д	?			
	1-13	-	Безымянная (верховья)	л.п. р.Киша	Д	5 765	Угроза а/д	-/-	Паводок**. Не обследована
	1-14	-	Урочище Долматова	л.п. р.Киша	Д	6 968	Угроза а/д	-/-	Паводок**. Не обследована
	1-15	-	Гефо	л.п. р.Киша	Д	11 482	Угроза а/д	-/-	Сель**. Не обследована
	1-16	-	Холодная	л.п. р.Киша	Л-Д, Д	38 900	Угроза а/д	-/-	Сель**. Не обследована
	1-17	-	б/н	л.п. р.Киша	Л-Д, Д	8 042	-	-/-	Паводок**. Не обследована
	1-18	-	б/н	л.п. р.Киша	Л; Л- Д	43 919	-	-/-	Сель**. Не обследована
	1-19	-	б/н	п.п. р.Киша	Л-Д; Д	8 395	Угроза а/д	-/-	Паводок**. Не обследована
	1-20	-	б/н	п.п. р.Киша	Д	2 005	Угроза а/д	-/-	Паводок**. Не обследована
	1-21	-	Китайка	п.п. р.Киша	Л-Д, Д	30 807	Угроза а/д	-/-	Сель**. Не обследована
	1-22	-	Грустная	п.п. р.Киша	Д	17 276	Угроза а/д	-/-	Сель**.

	1-23 1-24	-	Туровая	п.п. р.Киша	Д	6 700		-/-	Не обследована Паводок**. Не обследована
		-	б/н	п.п. р.Киша	Д	13 365	Угроза а/д	-/-	
1-27 <sub>1</sub>	1-25	-	б/н(3), Шиша (верховья)	л.п. р.Шиша п.п. р.Киша	Д	от 3603 до 5690 2284		-/-	Паводок**. Не обследованы
1-27	-	1032	24.Устье р. Киша	п.п. р. Белая	Л-Д, Д			22.05.2019	Свежие следы селя
1-28	-	-	25. Руч.Блокгаузный	п.п. р. Белая	Д			22.05.2019	Паводок
1-29	-	-	26. Р. Грушевая	п.п. р. Белая	Д			22.05.2019	Паводок
1-30	-	-	27. Руч. Золотой	п.п. р. Белая	Д			22.05.2019	Паводок
1-31	-	-	28. Руч. Липовый	п.п. р. Белая	Д			22.05.2019	Паводок
1-32	-	-	30. Р. Сюк	п.п. р. Белая	Д			22.05.2019	Паводок
1-33		1034	30. Р. Грузинка, устье	п.п. р. Белая	Д		Ниже п. Никель	22.05.2019	Паводок
1-34	-	-	31. Р. Дах(Дох)	п.п. р. Белая	Д		Угроза ЮВ части ст. Даховская, а/д и мосту через р. Дах	22.05.2019	Свежие следы селя
1-35	-	-	32. Р. Мишоко	п.п. р. Белая	Д				Паводок
1-35 ?	1-29	-	б/н	п.(л.) п. р.Белая	Д	7 369	Ниже(упос.)Каменно-мостский. Угроза пос., а/д	3-7/-	?
1-36	-	-	33.Р. Средний Хаджох	п.п. р. Белая	Д			24.05.2019	Паводок
1-37	-	-	34. Р. Малый Хаджох	п.п. р. Белая	Д			24.05.2019	Паводок
1-38			35. Р. Фюнта	п.п. р. Белая	Д			24.05.2019	Паводок
1-39	-	-	36. Р. Майкопка	п.п. р. Белая	Д			24.05.2019	Паводок
1-40	-	-	37. Р. Чумная Балка	п.п. р. Белая	Д			24.05.2019	Паводок

Примечания: ?-данные нуждаются в уточнении; \*-данные сняты с космоснимков; \*\*-расчётные данные.

Принятые сокращения: р - река; руч - ручей; л.п - левый приток; п.п - правый приток; пос - посёлок, ст - станица, с – село; а/д - автодорога

Курсивом выделены уточнённые и дополненные авторами данные.



Для уточнения природной опасности по основным ОПП (сели и паводки) в бассейне р. Белой был проведён мониторинг ОПП летом 2019 г. и выявлены последствия массового схода селей и паводков, а также участки склонов со свежими следами оползневой и обвально – осыпной деятельности, сформировавшиеся в результате с поверхностного смыва, и приведшие к разрушениям полотна автодорог и их заносу.

При этом существующая система защитных селевых и противопаводковых сооружений (в большинстве случаев это трубы различного диаметра и из различного материала, проложенные под полотном автодороги) не эффективна и требует обновления, или просто отсутствует (например, участок автодороги в пос. Гузерипль, см. № 1-15, таблица).

Кроме того, для корректного прогнозирования паводковых и селевых явлений необходимо дополнительно изучение нивально-гляциальных процессов, в т.ч. ледников и снежных лавин (верховья р. Белой, с правыми притоками, рр. Чессу, № 1-22, Молчепа, № 1-25, и Киша, № 1-27). Крайне важно это и для изучения снеголавинных процессов в районе Рекреационного комплекса «Лаго-Наки».

В целом, можно сделать *вывод*, что бассейн р. Белая имеет среднюю степень природной, в частности, селевой опасности. Паводковая же опасность может быть на порядок выше за счёт некоторых природных (наличие склонов с поверхностным смывом) и антропогенных (комплекс водохранилищ на р. Белой) факторов. Последний фактор необходимо учитывать, в первую очередь, для оценки паводковой опасности территории Краснодарского края, находящейся в зоне экологического риска – зоне подтопления при прохождении паводка на р. Белой и аварийном сбросе воды из водохранилищ (так в свое время произошло в 2012 году, когда был затоплен г. Крымск). Кроме того, устойчивые изменения климатических параметров горной зоны обнаружены в основном в период селевой и паводковой опасности в регионе. Их направление указывает на то, что вероятность формирования опасных природных процессов в горных районах Северного Кавказа не снижается. И это необходимо учитывать при прогнозировании схода ОПП.

Поэтому необходимо проведение геоэкологического мониторинга ландшафтов с учётом освоенности и ОПП с расширением исследуемой территории и захватом предгорной и равнинной зон, что даст возможность в дальнейшем подключить к оценке такие типы ОПП, как карст, просадки, эрозию, подтопления, а также такие неблагоприятные метеорологические процессы, как засуха, град и др. Это позволит в дальнейшем сделать полную комплексную численную интегральную оценку подверженности территории ОПП картографическим способом, т.е. построить комплект средне- и крупномасштабных карт фактической природной опасности (по основным типам ОПП) с учетом освоенности. Районирование на основе таких карт даст возможность выдать рекомендации по защите территории от воздействия ОПП и снижению этого воздействия до минимального уровня.

## Список литературы

1. Кадастр лавинно – селевой опасности Северного Кавказа. /В.В. Разумов, В.В. Перекрест, Н.П. Стрешнева и др. - С.-Пб.: Гидрометеоздат, 2001. - 112 с.
2. Кадастр селевой опасности Юга европейской части России / Н.В. Кондратьева, А.Х. Аджиев, М.Ю. Беккиев, М.М. Гедуева (Гяургиева) и др. - Нальчик: Изд-во «Печатный двор», 2015. - 148 с.
3. Все реки. Информационный сайт о реках России. [Электронный ресурс]. - <https://vsereki.ru/> (дата обращения 15.11.2019)
4. Вода России. Научно-популярная энциклопедия. [Электронный ресурс] - [https://water-rf.ru/Водные\\_объекты/2150/Белая](https://water-rf.ru/Водные_объекты/2150/Белая) (дата обращения 02.10.2019)
5. Государственный водный реестр [Электронный ресурс]. - [www.textual.ru /gvr/](http://www.textual.ru/gvr/).
6. Лурье П.М. Панов В.Д. Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. - СПб.: Гидрометеоздат, 2005. – 500 с.
7. GIS-Lab: Обработка многозональных космоснимков. [Электронный ресурс]. - <http://gis-lab/info/qa/multispec-sat.htm>.
8. Кюль Е.В., Борисова Н.А. Геоэкологическое районирование территории Республики Адыгея и Краснодарского края по степени подверженности опасным природным процессам. / В сборнике: «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Тезисы материалов V Международной научно-практической конференции. - 2019. - С.263-292.
9. Kyul E.V. Geocological monitoring of dangerous natural processes. International Journal of Ecology & Development. - V.35. - N 2.- 2020. - Pp.55-66.



# МЕЖГОДОВАЯ И СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОСНОВНЫХ ГИДРОМЕТЕРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ БЕЛОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

<sup>1,2,3</sup>С.А. Лебедев, <sup>1,4,5</sup>А.Г. Костяной, <sup>1,4</sup>Е.А. Костяная, <sup>1,4</sup>И.В. Серых  
*sergey\_a\_lebedev@mail.ru; kostianoy@gmail.com; janekost@mail.ru, iserykh@gmail.com*

<sup>1</sup>Геофизический центр РАН, Россия, г. Москва

<sup>2</sup>Майкопский государственный технологический университет, Россия, г. Майкоп

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, г. Москва, г. Зеленоград

<sup>4</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, г. Москва

<sup>5</sup>Московский университет им. С.Ю. Витте, Россия, г. Москва

**Аннотация.** Работа посвящена анализу сезонной и межгодовой изменчивости уровня и значимых высот волн на акватории Белого моря. Для исследования наиболее оптимальным является выбор данных альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, ERS-1/2, ENVISAT и SARAL/Altika. Показано, что для временного интервала с 1992 по 2018 год уровень моря растет со скоростью  $+3,32 \pm 0,61$  мм/год сопоставимой со скоростью подъема уровня Мирового океана. Анализ межгодовой изменчивости значимых высот волн для периода, когда ледяной покров на акватории моря не наблюдается, показал общую тенденцию на снижение. Максимальный линейный тренд  $-1,29 \pm 0,64$  см/год наблюдается в сентябре, минимальный  $1,10 \pm 0,53$  см/год – в августе.

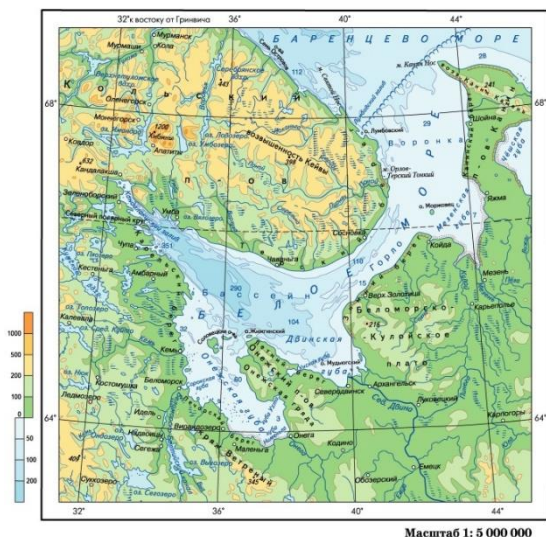
**Ключевые слова.** Белое море, дистанционное зондирование, спутниковая альтиметрия, уровень моря, значимая высота морских волн.

## Введение

Около 90% всей площади арктического шельфа России, составляющего 5,2–6,2 млн км<sup>2</sup>, приходится на перспективные нефтегазоносные области. В том числе 2 млн км<sup>2</sup> – в Западной Арктике, где потенциальные ресурсы углеводородного сырья составляют 50–60 млрд кубометров. Сегодня освоение Арктики требует новых подходов, обеспечивающих рациональное недропользование и охрану природы на основе современной науки и технологий [11], и прежде всего на основе использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Спутниковая альтиметрия в настоящее время является единственным методом ДЗЗ, который позволяет исследовать уровенный режим, как Мирового океана, так и морей арктического шельфа Российской Федерации. Эти моря характеризуются сложными гидродинамическими, приливными, ледовыми и метеорологическими режимами, что обуславливает особенности обработки данных спутниковой альтиметрии для этого региона.

а)



б)

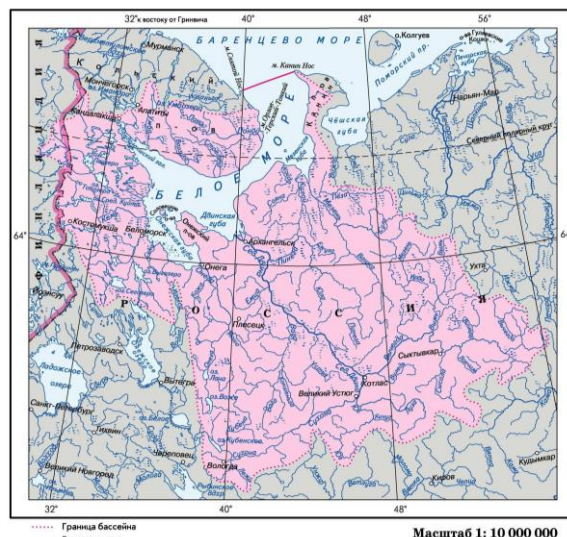


Рис. 1. Физическая карта Белого моря (а) и его водосборного бассейна (б).

Таблица 1

Физико-географические характеристики Белого моря (данные из работ [1-3, 14, 26])

Характеристика	Белое море
Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	85–91
Объем, тыс. км <sup>3</sup>	5–6
Средняя глубина, м	49–67
Максимальная глубина, м	340–350
Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	717,7–720

### Особенности гидрологического режима

Особенности гидрологического режима Белого моря обусловлены; физико-географическими характеристиками (табл. 1) (рис. 1а, 1б), особенностями водного и ледового баланса моря, которые в первую очередь влияют на уровенный режим моря.

Водный баланс Белого моря, в особенности, соотношение таких его составляющих, как материковый сток и водообмен с Баренцевым морем, играющих большую роль в формировании гидрологического режима, является одним из основных факторов, влияющих на его уровенный режим.

Площадь водосбора Белого моря (рис. 1б) в 8 раз превышает площадь акватории моря и является наибольшим показателем для всех окраинных морей Северного Ледовитого океана. Впадающие в Белое море реки ежегодно приносят около 215–230 км<sup>3</sup> пресной воды. Территория водосбора условно разделена на три района. Район 1 включает водосборы рек Кольского полуострова, впадающих в Белое море между м. Святой Нос и п. Кандалакша (включая р. Ниву), район 2 – водосборы рек Республики Карелии, впадающих между п. Кандалакша и р. Онегой (исключая ее), и район 3 – водосборы рек территории Архангельской области, впадающих в море между р. Онегой и м. Канин Нос.

Средние многолетние значения притока речных вод в Белое море по району 1 составляет около 24 км<sup>3</sup>/год, по району 2 – 34 км<sup>3</sup>/год, по району

3 – 170 км<sup>3</sup>/год. Более 3/4 всего стока приходится на реки, впадающие в заливы: Онежская губа (р. Онега – 15,4–27 км<sup>3</sup>/год), Двинская губа (р. Северная Двина – 106,6–171 км<sup>3</sup>/год) и Мезенская губа (р. Мезень 20,6–38,5 км<sup>3</sup>/год). Максимум стока наблюдается весной и составляет 40% годового стока. Для моря в целом максимальный сток приходится на май, минимальный – на февраль–март. За год возобновляется более 2/3 всей массы беломорской воды [1-3, 14, 26].

Водообмен с Баренцевым морем является важнейшей составляющей водного баланса Белого моря. В среднем он составляет 200–231 км<sup>3</sup>/год. Отток беломорских вод (2200–2231 км<sup>3</sup>/год) превышает приток из Баренцева моря (~2000 км<sup>3</sup>/год) в течение всего года. Обеспечивается он, прежде всего, более высоким уровнем Белого моря, который в свою очередь создается значительным притоком пресных вод [2, 3, 14].

Средние многолетние осадки над акваторией моря Белого моря составляют 37,8–54 км<sup>3</sup>/год, а испарение – составляет 23 км<sup>3</sup>/год [2, 3].

Ледовый режим. Каждую зиму Белое море покрывается льдом, который исчезает весной, поэтому оно относится к морям с сезонным ледяным покровом. Лед в Белом море наблюдается обычно с ноября по май, однако бывают годы, когда он появляется в начале октября и исчезает в первой половине июля. Первое появление льда отмечается в 3-й декаде ноября у берегов Двинского и Онежского заливов, а затем в западной части Горла моря и вдоль Терского берега на участке от маяка Терско-Орловский до м. Святой Нос. К концу декабря почти вся акватория покрывается льдом, который держится до конца мая. В редкие годы весь лед тает на месте, а в большинстве случаев он выносится в Баренцево море [2, 3].

Особенностью ледяного покрова Белого моря является его неустойчивость, вызываемая сильными приливно-отливными течениями и ветрами. Наблюдаемый в Горле и центральной части Бассейна моря дрейф льда совпадает по направлению и скорости с течениями, но иногда под влиянием ветров скорость дрейфа льда отличается от скорости течений. При приливе обычно наблюдается сжатие льдов, а при отливе – разрежение. Весьма существенная черта ледового режима Белого моря – постоянный вынос льда в Баренцево море 13,6–31,31 км<sup>3</sup>/год. С ним связаны полыньи, постоянно образующиеся среди зимы, которые быстро затягиваются молодым льдом [2, 3].

Уровенный режим. Колебания уровня Белого моря в основном связаны с приливо-отливными и сгонно-нагонными явлениями, а в устьевых участках рек также с весенними половодьями.

Приливы. Приливные явления в арктических морях определяются в основном приливной волной, распространяющейся из Атлантического океана.

На большей части акватории Белого моря приливы носят правильный полусуточный характер: в течение суток наблюдаются две полные и две малые воды. Приливная волна из Баренцева моря входит в Северную часть Белого моря. Часть приливной волны, достигнув Горла моря, следует вдоль Терского и Зимнего берегов, при этом ее движение вдоль менее глубокого Зимнего

берега замедляется. В Двинском заливе скорость приливной волны еще больше уменьшается [3].

Средняя величина прилива в Бассейне моря колеблется от 0,9 до 1,2 м. Время падения и время роста почти одинаковы. В Северной части моря средняя величина прилива колеблется от 1,8 до 4,7 м. Заметное влияние на приливы оказывает мелководье, которое обуславливает увеличение времени падения по сравнению со временем роста. В Мезенском заливе средняя величина прилива составляет 6,6 м, а наибольшая – 10 м [2].

В вершине Двинского залива величина прилива почти вдвое меньше, чем при входе в него. Значительный приток речной воды обуславливает превышение времени роста над временем падения почти на 1 час. В Онежском заливе величины прилива в сизигию и квадратуру мало отличаются друг от друга. Величина прилива у Поморского берега больше, чем у Онежского. Во всех пунктах время падения почти на 1,2 часа больше времени роста [2]. В Кандалакшском заливе средняя величина прилива возрастает от 1,2 м у входа в залив до 1,9 м в вершине. Время падения на 1,5–2,2 часа больше времени роста [4].

Остаточные приливные явления. В результате нелинейного взаимодействия основных волн прилива в Белом море появляются обертоны, остаточных эффектов, долгопериодных и короткопериодных приливных гармоник.

Механизмы возникновения нелинейных остаточных приливных явлений связаны с тремя типами нелинейных эффектов: конвективная нелинейность, фрикционная нелинейность, обусловленная квадратичным законом донного трения, и мелководная нелинейность [13].

В результате нелинейных приливных явлений и нелинейного взаимодействия основных приливных волн ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ) возникает множество дополнительных приливных гармоник [5].

По результатам численного моделирования [9, 10] суммарная амплитуда нелинейных гармоник в Белом море составляет более 50% от амплитуд основных приливных волн за исключением Горла (25–50%) и Воронки (10–25%). Максимальная амплитуда нелинейных гармоник около 100% наблюдается в Двинском и Кандалакшском заливах [24].

Сгонно-нагонные колебания. На большей части побережья Северного Ледовитого океана сгонно-нагонные колебания уровня воды значительно больше, чем приливы и отливы.

Длительность нагонов в Белом море в среднем равна 3–4 суткам, но в некоторых случаях они могут продолжаться неделями. Средняя величина нагона изменяется от 46 см в Кандалакшском заливе до 88 см в Онежском заливе. Максимальный уровень при нагоне (более 2 м) также отмечается в Онежском заливе. Сгоны приводят к меньшим изменениям колебания уровня в 1,5–2 раза, но их длительность существенно выше: 4–5 суток при средних сгонах и до полумесяца при максимальных. В Кандалакшском заливе нередки случаи, когда сгонно-нагонные колебания уровня составляют около 0,5 м.

В Онежском заливе отмечены нагонные подъемы уровня, которые на 1,5 м выше приливного уровня [2].

**Режим волнения.** Белое море принадлежит к числу бурных морей. Наиболее сильное волнение наблюдается в октябре–ноябре в северной части и Горле моря. В это время наблюдается волнение преимущественно 4–5 баллов (высота волн – 1,25–4 м) и более. Однако небольшие размеры водоема не позволяют развиваться крупным волнам. В Белом море преобладают волны высотой до 1 м. Изредка они достигают высоты 3 м и как исключение 5 м. Наиболее спокойно море во второй половине лета, в июле–августе. В это время преобладает волнение силой 1–3 балла (высота волн – 0,1–1,25 м) [3].

На распространение ветровых волн и зыби значительное влияние оказывают изрезанность береговой черты, наличие многочисленных островов, а также сильные приливные течения. Последние, в случае распространения волн навстречу потоку, могут увеличивать высоту волны более чем в два раза. Попутное течение, наоборот, уменьшает высоту до полутора раз. В Белом море наиболее высокие волны развиваются в северной части – Горле и Воронке, где при сильных штормах могут достигать значений свыше 10 м [2].

#### **Данные спутниковой альтиметрии**

Для анализа гидрологического режима Белого моря наиболее оптимальными являются данные спутников ERS–1/2, EnviSat и SARAL/AltiKa с периодом повторения изомаршрутного цикла 35 дней, а также данные спутников TOPEX/Poseidon и Jason–1/2/3 с периодом повторения изомаршрутного цикла 9,9 суток (рис. 2).

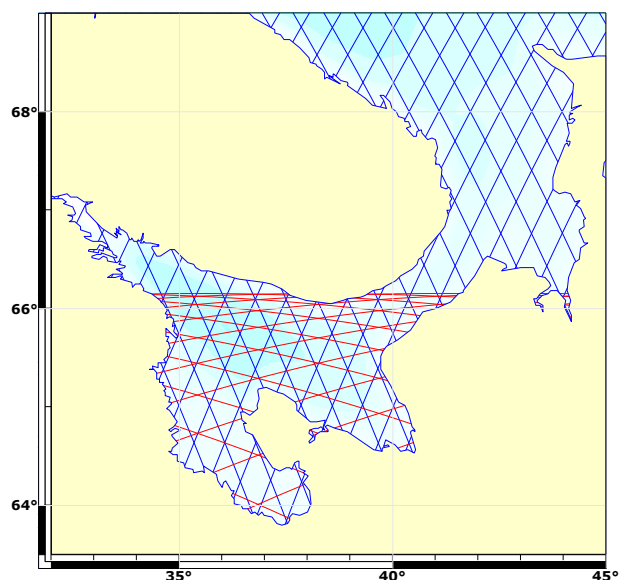


Рис. 2. Положение треков спутников ERS–1/2, EnviSat и SARAL/AltiKa (синяя линия) и спутников TOPEX/Poseidon и Jason–1/2/3 (красная линия) на акватории Белого моря

Массив данных спутника ERS–1 [23] представляет собой прерывный, но длинный по времени ряд измерений – Фаза С (апрель 1992 г. – декабрь 1993 г.) и Фаза G (апрель 1995 г. – июнь 1996 г.) с возможностью его продления данными спутника ERS–2 [23] (апрель 1995 г. – июнь 2002 г.), спутника EnviSat [22] (март 2002 г. – апрель 2012 г.) и спутника SARAL/AltiKa [18] (февраль 2013 г. – настоящее время).

В свою очередь массив данных спутника TOPEX/Poseidon [17] представляет собой непрерывный и наиболее длинный по времени ряд

измерений (сентябрь 1992 г. – август 2002 г.) с возможностью его продления данными спутника Jason-1 [30] (декабрь 2001 г. – февраль 2009 г.), спутника Jason-2 [21] (июнь 2008 г. – настоящее время) и спутника Jason-3 [20] (январь 2016 г. – настоящее время).

**Обработка данных спутниковой альтиметрии** проводилась с применением программного обеспечения Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА), разработанной в Геофизическом центре РАН, с учетом всех необходимых поправок [7]:

- Поправка на «сухую» атмосферу, рассчитанную по модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) [35].

- Поправка на влажность также рассчитывалась по модели ECMWF.

- Ионосферная поправка рассчитывалась по модели NOAA Ionosphere Climatology 2009 (NIC09) [31].

- Поправка на состояние подстилающей поверхности или электромагнитное смещение (ElectroMagnetic Bias – EMB) рассчитывалась по модели [32].

- Поправка обратного барометра также рассчитывалась по модели ECMWF.

- Приливная поправка рассчитывалась по данным региональной модели приливов, входящей в состав оперативной модели краткосрочного прогноза уровня моря и скорости течений в Баренцевом и Белом морях Гидрометцентра РФ [12]. Использование региональной модели приливов обусловлено большой ошибкой расчета высоты прилива по глобальным моделям как в арктических морях [28], так и в Белом море, в частности [8].

- Поправка на приливы в земной коре, рассчитанные по модели [27].

- Поправка на полюсный прилив по модели [29].

- Поправка, связанная с систематической ошибкой, рассчитывалась по результатам работы [6]. Для акваторий Белого моря разница в измерениях уровня спутниками ERS-2 и ERS-1 в среднем составила  $+1,37 \pm 0,94$  см, а для спутников EnviSat и ERS-2  $+1,78 \pm 0,65$  см. Между альтиметрическими измерениями спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1 систематическая ошибка составила  $+2,61 \pm 0,27$  см, а для спутников Jason-1 и Jason-2 –  $-1,83 \pm 0,34$  см, Jason-2 и Jason-3 –  $+2,18 \pm 0,27$  см.

Аномалии высот морской поверхности рассчитывались относительно модели средних высот морской поверхности DTU13 MSS [16].

**Верификации данных спутниковой альтиметрии** проводилась путем сравнения данных измерений уровня на уровневых постах с данными альтиметрических измерений в точках, расположенных на ближайших треках или в точках пересечения восходящих и нисходящих треков.

Для Белого моря, сравнение спутниковых данных и данных уровневых постов показывает значимые величины корреляции (более 0,6) для всех спутников [6, 24]. Так для уровневого поста Онега коэффициент корреляции для данных спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3 составил 0,762, а для

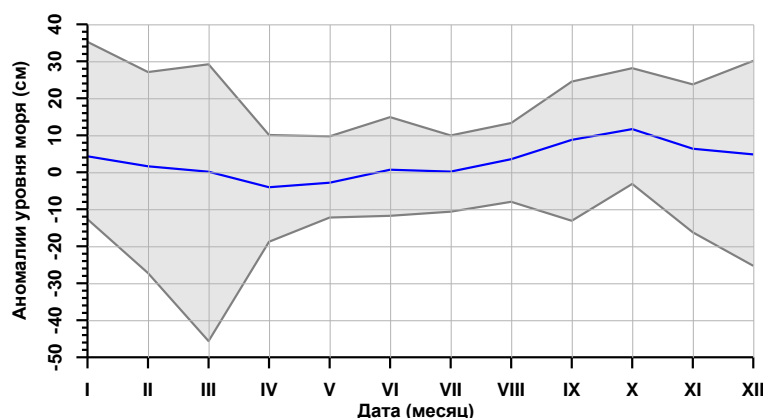


спутников ERS-1/2, EnviSat и SARAL/AltiKa – 0,963, а для уровневого поста Северодвинск – 0,974 и 0,983, соответственно. Большие величины коэффициента корреляции для этих постов обусловлены их местоположением. Они расположены в устьях рек, где сток рек оказывает сильное влияние на гидрологический режим в этих районах Белого моря. Минимальные величины коэффициента корреляции (0,664 и 0,614, соответственно) наблюдаются для уровневого поста Кемь порт, где нелинейные и остаточные приливные явления оказывают сильное влияние на уровеньный режим моря.

## Результаты

Изменчивость уровня моря. Средняя сезонная изменчивость уровня Белого моря за период 1992–2018 гг. составила 16 см с минимальными значениями уровня в апреле и максимальными в октябре (рис. 3). Размах между максимальными и минимальными значениями за этот временной период составил 70 см в марте. Следует отметить, что значения уровня с октября по март мало репрезентативны, потому что число измерений в этот временной интервал невелико из-за ледяного покрова, и они, в основном, расположены в немногочисленных полыньях. Полная картина изменчивости уровня за период 1992–2018 гг. представлена на рис. 4.

Рис. 3. Сезонная изменчивость аномалий уровня Белого моря по данным альтиметрических измерений за период 1992–2018 гг. Синяя линия – средняя за весь временной интервал. Серая область ограничивается минимальным и максимальным значением



Межгодовая изменчивость сезонных колебаний уровня Белого моря в среднем составляет  $2,94 \pm 1,59$  мм/год. Максимальная величина  $8,17 \pm 3,42$  мм/год наблюдается в ноябре, а минимальная  $-3,43 \pm 1,42$  мм/год – в феврале (рис. 5).

Межгодовая изменчивость аномалий уровня Баренцева моря по данным спутниковых альтиметрических измерений за период 1992–2018 гг. показана на рисунке 6. В целом уровень моря повышается со средней скоростью около  $+3,32 \pm 0,61$  мм/год (рис. 6). Это привело к общему повышению уровня Белого моря с 1992 по 2018 год примерно на 8,3 см.

Анализ межгодовой изменчивости уровня моря для отдельных месяцев (июнь, июль, август и сентябрь (рис. 7) показал их различное поведение. Некоторые из них демонстрировали изменения в фазе в течение нескольких лет и изменения в противофазе в течение других периодов времени. Линейные тренды для всех месяцев были положительными, но также показали совершенно разные значения: для июня –  $+5,19 \pm 0,40$  мм/год, для июля –  $+4,76 \pm 0,37$  мм/год, для августа –  $+2,85 \pm 0,19$  мм/год, а для сентября –  $+5,42 \pm 0,30$  мм/год (рис. 7). Эти различия в тенденциях могут быть объяснены значительными изменениями в



гидрологическом режиме Белого моря, а также в атмосферном воздействии из-за регионального изменения климата в эти годы.

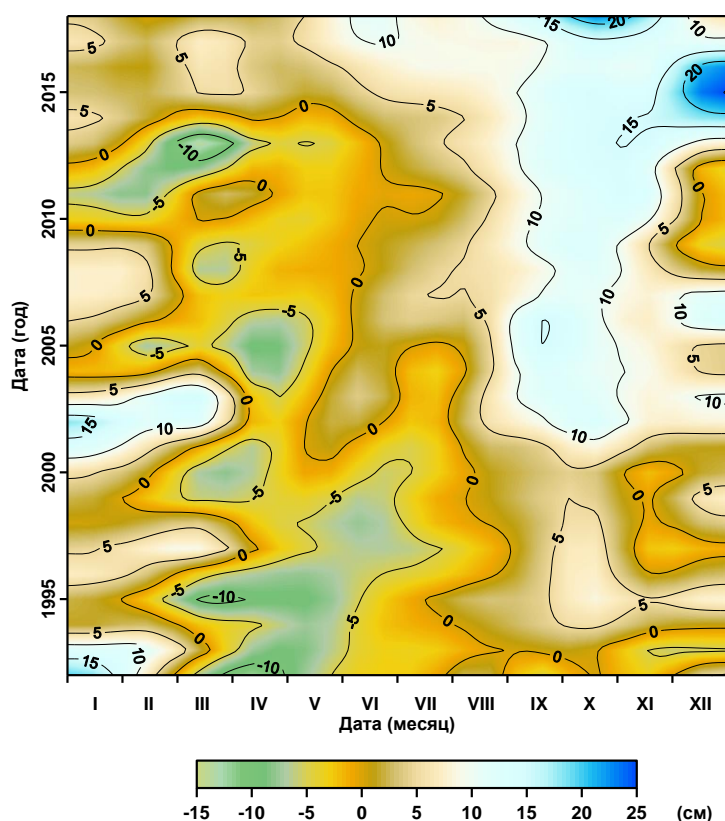
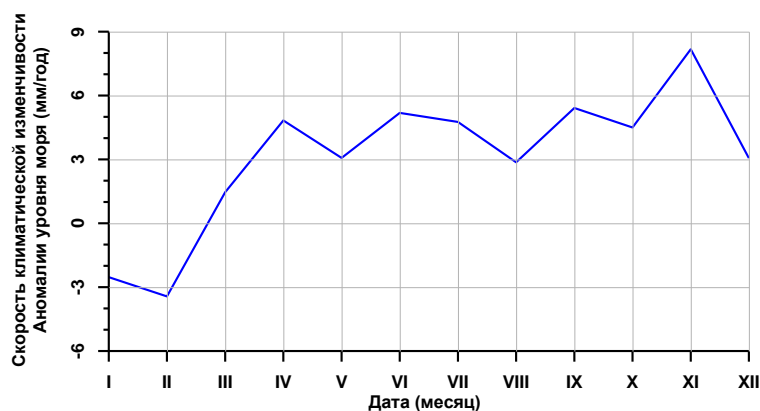


Рис. 4. Сезонная изменчивость аномалий уровня Белого моря по данным альтиметрических измерений за период 1992–2018 гг.

Рис. 5. Скорость климатической изменчивости сезонных аномалий уровня Белого моря по данным альтиметрических измерений за период 1992–2018 гг.



Изменчивость скорости ветра. Анализ сезонной и межгодовой изменчивости скорости ветра над акваторией Белого моря не репрезентативен, так как модели расчета скорости ветра по данным о коэффициенте обратного рассеяния не работают, когда расстояние от береговой линии не превышает 15 км [25]. Это говорит о том, что алгоритмы ретрекинга, используемые при обработке данных спутниковой альтиметрии в прибрежной зоне, дают большую ошибку при вычислении коэффициента обратного рассеяния. В этом случае необходима разработка новых алгоритмов ретрекинга, например, как в работах [15, 33, 34].

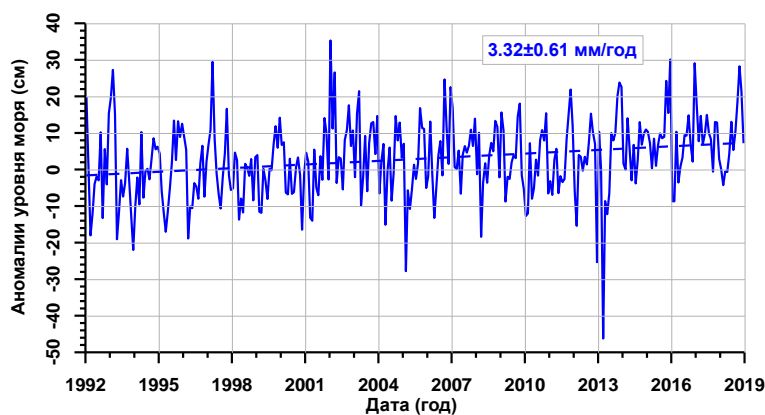
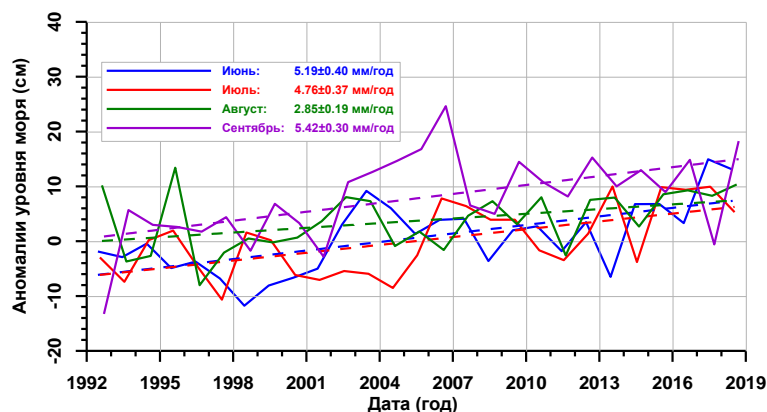


Рис. 6. Межгодовая изменчивость аномалий уровня Белого моря по данным альтиметрических измерений за период 1992–2018 гг. Пунктирной линией показан линейный тренд

Рис. 7. Межгодовая изменчивость аномалий уровня Белого моря по данным альтиметрических измерений за период 1992–2018 гг. в июне, июле, августе и сентябре



Изменчивость значимых высот волн. Значимая высота волны получается при обработке формы отраженного импульса альтиметра алгоритмом ретрекинга [19]. Анализ межгодовой изменчивости значимых высот волн для отдельных месяцев (июнь, июль, август и сентябрь (рис. 7) показал различное поведение значимых высот волн (как и уровня моря) в разные месяцы. Некоторые из них демонстрировали изменения в фазе в течение нескольких лет и изменения в противофазе в течение других периодов времени. Линейные тренды для всех месяцев были отрицательными, но также показали совершенно разные значения: для июня –  $-1,11 \pm 0,53$  см/год, для июля –  $-1,23 \pm 0,64$  см/год, для августа –  $-1,10 \pm 0,53$  см/год, и для сентября –  $-1,29 \pm 0,64$  см/год (рис. 8). В целом, наблюдается снижение значимых высот волн от года в году. Это можно объяснить не столько аналогичной тенденцией в скорости ветра, а изменчивостью продолжительности по времени направления ветра, которое определяет ветровой разгон.

### Заключение

Исследование межгодовой и сезонной изменчивости уровня и значимых высот по данным спутниковой альтиметрии показало, что уровень Белого моря растет со скоростью  $+3,32 \pm 0,61$  мм/год, что сопоставимо со скоростью подъема уровня Мирового океана. Однако, для периода, когда ледяной покров на акватории моря не наблюдается (июнь, июль, август и сентябрь), скорость роста уровня моря изменяется от  $+2,85 \pm 0,19$  мм/год в августе, до  $+5,42 \pm 0,30$  мм/год в сентябре. Климатической изменчивости подвержены и сезонные изменения уровня моря. В среднем она составляет  $2,94 \pm 1,59$  мм/год.

Максимальная величина  $8,17 \pm 3,42$  мм/год наблюдается в ноябре, а минимальная  $-3,43 \pm 1,42$  мм/год – в феврале.

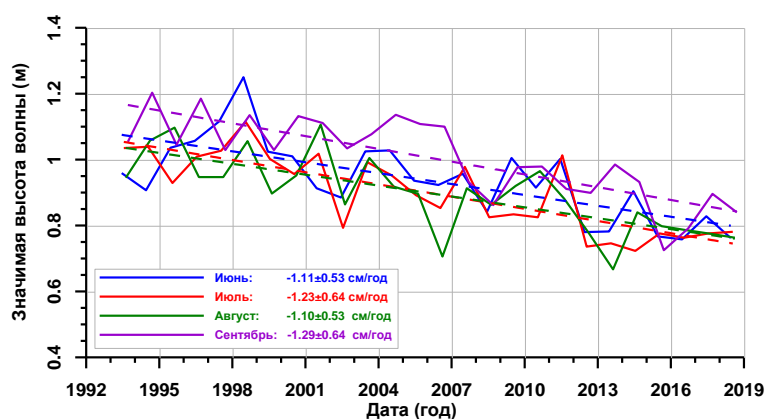


Рис. 8. Межгодовая изменчивость значимой высоты волн в Белом море по данным альтиметрических измерений за период 1992–2018 гг. в июне, июле, августе и сентябре

Анализ межгодовой изменчивости значимых высот волн для периода, когда ледяной покров на акватории моря не наблюдается, показал общую тенденцию на снижение. Максимальный линейный тренд  $-1,29 \pm 0,64$  см/год наблюдается в сентябре, минимальный  $-1,10 \pm 0,53$  см/год – в августе.

*Исследование выполнено в рамках проекта РНФ N 21-77-30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта» (2021–2024 гг.).*

### Список литературы

1. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. /Ред. Н.Н. Филатов, А.Ю. Тержевик, Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – 349 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, Т. 2, Белое море, Вып. 1, Гидрометеорологические условия /Под ред. Б.Х. Глуховского. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 240 с.
3. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 192 с.
4. Ионов В.В., Май Р.И., Смагин Р.Е. Численная гидродинамическая модель приливных явлений в губе Кереть (Кандалакшский залив, Белое море) //Известия Русского географического общества. – 2015. – Т. 147. – № 2. – С. 22-37.
5. Каган Б.А., Романенков Д.А. О влиянии нелинейного взаимодействия приливных гармоник на их пространственную структуру применительно к системе Баренцева и Белого морей //Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43. – № 5. – С. 710-717.
6. Лебедев С.А. Методика обработки данных спутниковой альтиметрии для акваторий Белого, Баренцева и Карского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 6. – С. 203-223.
7. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. – М.: Изд. центр «МОРЕ» Международного института океана, 2005. – 366 с.
8. Лебедев С.А., Сирота, А.М., Медведев, Д.П. и др. Верификация данных спутниковой альтиметрии в прибрежной зоне европейских морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2008. – Т. 5. – № 2. – С. 137-140.
9. Май Р.И. Линейные и нелинейные приливные явления в морях Европейской Арктики //Проблемы Арктики и Антарктики. – 2008. – № 3(80). – С. 115-125.
10. Май Р.И. Оценка вклада различных нелинейных эффектов в формирование остаточных приливных явлений Белого моря. // Труды ГОИН. – 2004. – Вып. 210. – С. 126-136.

11. Мастепанов А.М. Освоение углеводородных ресурсов Арктики: надо ли торопиться? // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2014. – № 3. – С. 4-14.
12. Попов С.К., Лобов А.Л., Елисов В.В. и др. Прилив в оперативной модели краткосрочного прогноза уровня моря и скорости течений в Баренцевом и Белом морях // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 6. – С. 68-82.
13. Сгибнева Л.А. Изменчивость гармонических постоянных прилива как следствие нелинейных эффектов // Труды ГОИН. – 1981. – Вып. 156. – С. 33-40.
14. Система Белого моря. Том I. Природная среда водосбора Белого моря. / Отв. ред. А.П. Лисицын, Ред. И.А. Немировская, В.П. Шевченко. – М., Научный мир. – 2010. – 480 с.
15. Троицкая Ю.И., Рыбушкина Г.В., Соустова И.А. и др. Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов // Водные ресурсы. – 2012. – Т. 39. – № 2. – С. 169-169.
16. Andersen O., Knudsen P., Stenseng L. The DTU13 MSS (mean sea surface) and MDT (mean dynamic topography) from 20 years of satellite altimetry // International Association of Geodesy Symposia. – Vol. 144. – Berlin Heidelberg: Springer, 2015. – P. 111-121. doi: 10.1007/1345\_2015\_182
17. Benada J.R. PODAAC Merged GDR (TOPEX/Poseidon) Generation B User's Handbook, JPL D-11007, Version 2.0. – Pasadena: JPL, 1997. – 131 pp.
18. Bronner E., Guillot A., Picot N. SARAL/AltiKa Products Handbook, SALP-MU-M-OP-15984-CN, Issue 3, Rev 1. – Toulouse: Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), 2021. – 93 pp.
19. Brown G. The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE transactions on antennas and propagation. – 1977. – Vol. 25. – № 1. – P. 67-74. doi: 10.1109/TAP.1977.1141536.
20. Dumont J.P., Rosmorduc V., Carrere L. et al. Jason-3 Product Handbook, SALP-MU-M-OP-16118-CN, Issue 1, Rev 5. – Toulouse: Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), 2018. – 71 p.
21. Dumont J.P., Rosmorduc V., Picot N. et al. OSTM/Jason-2 Products Handbook. CNES: SALP-MU-M-OP-15815-CN, EUMETSAT: EUM/OPS-JAS/MAN/08/0041, JPL: OSTM-29-1237, NOAA/NESDIS: Polar Series/OSTM J400, Issue 1, Rev. 8. – Toulouse: Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), 2011. – 72 pp.
22. ENVISAT RA2/MWR Product Handbook. – Frascati: ESA, 2007. – 204 pp.
23. Gilbert L., Baker S., Dolding C. et al. REAPER Product Handbook for ERS Altimetry Reprocessed Products, REA-UG-PHB-7003, Issue 3.1. – Frascati: ESA, 2014. – 80 pp.
24. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Ginzburg A.I. et al. Satellite Altimetry Applications in the Barents and White Seas In: Coastal Altimetry /Eds. S. Vignudelli, A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. – Berlin: Springer-Verlag, 2011. – P. 389-416, doi: 10.1007/978-3-642-12796-0\_15.
25. Lebedev S.A., Sorokin A.S., Kluev P.V. et al. Validation of Wind Speed Calculated on Satellite Altimetry Data by Measurements on Weather Stations Located Along the White Sea Coast // Ecologica Montenegrina. – 2019. – Vol. 25. – P. 36-43.
26. Marchenko N. Russian Arctic Seas: navigational conditions and accidents. – Berlin: Springer Science & Business Media, 2012. – 293 pp.
27. McCarthy D.D., Petit G. IERS Technical Note 32. – Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004. – 127 pp.
28. Padman L., Erofeeva S. A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean // Geophysical Research Letters. – 2004. – Vol. 31. – № 2. – L02303. doi: 10.1029/2003GL019003
29. Petit G., Luzum B. IERS conventions (2010), IERS Technical Note 32. – Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. – 179 p.
30. Picot N., Case K., Desai S. et al. AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products, SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO), JPL D-21352 (PODAAC), Edition 4.1. – AVISO, PODAAC, 2008. – 130 pp.

31. Scharroo R., Smith W.H.F. A global positioning system–based climatology for the total electron content in the ionosphere // *Journal Geophysical Research*. – 2010. – Vol. 115. – № A10. – A10318. doi: 10.1029/2009JA0014719.
32. Tran N., Vandemark D., Chapron B. et al. New models for satellite altimeter sea state bias correction developed using global wave model data // *Journal Geophysical Research*. – 2006. – Vol. 111. – № C9. – C09009. doi: 10.1029/2005JC003406.
33. Troitskaya Y., Rybushkina G., Soustova I. et al. Adaptive retracking of Jason-1 altimetry data for inland waters: the example of the Gorky Reservoir // *International Journal of Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 33. – № 23. – P. 7559-7578. doi: 10.1080/01431161.2012.685972.
34. Troitskaya Y., Rybushkina G., Soustova I. et al. Adaptive retracking of Jason-1, 2 satellite altimetry data for the Volga River reservoirs // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 7. – № 5. – P. 1603-1608. doi: 10.1109/JSTARS.2013.2267092.
35. Uppala S.M., Kallberg P.W., Simmons A.J. et al. The ERA–40 reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2005. – Vol. 131, Part B. – № 612. – P. 2961-3012. doi: 10.1256/qj.04.176.