

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 2

**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

Беданок 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 2. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2021. – 199 с.

ISBN 978-5-907004-75-7

ISBN 978-5-907004-77-1 – Ч.2

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

Лебедев С.А., Костяной А.Г., Кравченко П.Н., Шевякова О.П. ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЗОННОЙ И МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИНДЕКСА NDVI НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АДЫГЕЯ.....	9
Лернер Е.Ф. ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ ПРОВИНЦИЙ ИСПАНИИ.....	22
Литвинская С.А. ОСТАНОВИТЬ УТРАТУ БИОРАЗНООБРАЗИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭКОСИСТЕМ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА И ЗАПАДНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ.....	24
Любов М.С. МИКРОКЛИМАТ ГОРОДА АРЗАМАСА НИЖЕГОРДСКОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА.....	33
Малиновский Д.Р., Малиновская Е.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВОЗДУШНЫХ МИКРОПОТОКОВ ОТ ПЕСЧАНОЙ ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	40
Мамонтов А.Е., Федорова О.В. ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ АЭРОЗОЛЯ В ТРОПОСФЕРЕ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ ПРОЕКТА DELICAT.....	42
Михеева Т.Л., Лапина Е.П. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПЛОЩАДЕЙ....	51
Назирова К.Р., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РЕЧНЫХ И ЛАГУННЫХ ВОД В КАСПИЙСКОМ, ЧЕРНОМ И БАЛТИЙСКОМ МОРЯХ.....	57
Нефедова Л.В. ОЦЕНКА РОЛИ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СНИЖЕНИИ ЭМИССИИ CO ₂ И ЭНЕРГОБЕСПЕЧЕНИИ РЕГИОНОВ РОССИИ.....	63
Пряхина С.И., Ормели Е.И. ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ.....	68
Репина И.А., Степаненко В.М., Вазаева Н.В., Ганбат Г. МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ.....	75
Рюмина А.А., Шкирникова Е.М., Тищенко П.Я. ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ДОННЫХ ОСАДКАХ МЕЛКОВОДНЫХ БУХТ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО.....	81
Салтыков В.А. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ СЕЙСМИЧНОСТИ: МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ (НА ПРИМЕРЕ КАМЧАТКИ).....	83

Сахно А.В., Лебедев С.А. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ.....	93
Свергун Е.И., Зимин А.В., Лазуткина Е.С. ПРОЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА В ЗИМНИЙ И ЛЕТНИЙ ПЕРИОД ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ.....	100
Серых И.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Костяная Е.А. О МЕЖДЕКАДНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА У ПОВЕРХНОСТИ В РЕГИОНЕ БЕЛОГО МОРЯ.....	105
Сиротюк Э.А., Гунина Г.Н., Шадже А.Е. РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ИЗМЕНЧИВОСТЬ МОРФОПАРАМЕТРОВ ВИДОВ РОДА <i>GALANTHUS</i> L. В РЕСПУБЛИКЕ АДЫГЕЯ.....	115
Сиротюк Э.А., Хирьянов В.В. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИДОВ РОДА <i>SERHALANTHERA</i> RICH.....	121
Скафарик А.И., Киселева С.В. ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В РЕГИОНАХ РОССИИ.....	127
Скороход А.И. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АТМОСФЕРНОЙ ХИМИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ИФА РАН.....	137
Третьяк И.Д., Лебедев С.А. МЕТОДЫ АССИМИЛЯЦИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ.....	139
Хатко З.Н., Тамахина М.А. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУФАБРИКАТОВ ДЛИТЕЛЬНОГО СРОКА ХРАНЕНИЯ.....	145
Черепанцев А.С. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ КЛАСТЕРОВ СБРОСОВ В ОФС МОДЕЛИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ.....	152
Чернова Н.И., Киселева С.В. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЙ ПИРОЛИЗА И ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО СЖИЖЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ ИЗ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ.....	157
Шакун В.П., Рафикова Ю.Ю., Киселева С.В. ПРИМЕНЕНИЕ ОТКРЫТЫХ ГИС-ИНСТРУМЕНТОВ К РАЗРАБОТКЕ КАРТ РЕСУРСОВ И ДОСТУПНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ И ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....	164
Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И. СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ПРИЗЕМНОГО СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА В АРКТИКЕ: НАБЛЮДЕНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	170
Экба Я.А., Пачулия Э.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ (ЦИКЛОНОВ И АНТИЦИКЛОНОВ) НА ТЕРРИТОРИИ АБХАЗИИ.....	178

Экба Я.А., Ахсалба А.К., Хинтуба Л.В. ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ВУЛКАНОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПСВ НА КАВКАЗЕ.....	187
Янина Т.А., Романюк Б.Ф., Сорокин В.М. ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ: РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ ГОЛОЦЕНА.....	196
Янина Т.А., Болиховская Н.С., Сорокин В.М. АТЕЛЬСКАЯ РЕГРЕССИЯ КАСПИЯ КАК ОТРАЖЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ.....	198

CONTENTS

Lebedev S., Kostianoy A., Kravchenko P., Shevyakova O. INVESTIGATION OF SEASONAL AND INTERANNUAL VARIABILITY OF THE NDVI INDEX IN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF ADYGEA.....	9
Lerner E. WATER SUPPLY TRANSFORMATION OF SPANISH PROVINCES.....	22
Litvinskaya S.A. STOP THE LOSS OF BIODIVERSITY TO ENSURE THE SUSTAINABILITY OF THE ECOSYSTEMS OF THE WESTERN CISCAUCASUS AND THE WESTERN CAUCASUS...	24
Lyubov M. MICROCLIMATE OF THE CITY OF ARZAMAS NIZHNY NOVGOROD REGION IN THE CONDITIONS OF GLOBAL CLIMATE CHANGE.....	33
Malinovsky D., Malinovskaya E. STUDY OF VERTICAL AIR MICROFLOWS FROM A SANDY POROUS SURFACE.....	40
Mamontov A., Fedorova O. STUDY OF SPECTRAL CHARACTERISTICS AND ANALYSIS OF AEROSOL OBSERVATIONS IN THE TROPOSPHERE OBTAINED USING THE DELICAT PROJECT.....	42
Miheeva T., Lapina E. COMPUTER TECHNOLOGY OF INTERPRETATION OF GEOPHYSICAL DATA FOR PROSPECTING OIL AND GAS AREA.....	51
Nazirova K., Lavrova O., Soloviev D. SPREADING OF RIVER AND LAGOON WATERS IN THE CASPIAN, BLACK AND BALTIC SEAS.....	57
Nefedova L. ASSESSMENT OF THE WINDFARMS ROLE IN CO ₂ EMISSIONS REDUCING AND POWER SUPPLY IN REGIONS OF RUSSIA.....	63
Pryakhina S., Ormeli E. THE IMPACT OF GLOBAL WARMING ON AGRICULTURAL PRODUCTION IN THE SARATOV REGION...	68
Repina I., Stepanenko V., Vazaeva N., Ganbat G. MESOSCALE CIRCULATIONS IN INLAND WATER BODIES.....	75
Ryumina A., Shkirknikova E., Tishchenko P. VERTICAL DISTRIBUTION OF HEAVY METALS AND ORGANIC CARBON IN BOTTOM SEDIMENTS OF SHALLOW COVES OF PETER THE GREAT BAY.....	81
Saltykov V. STATISTICAL ASSESSMENT OF THE SEISMICITY LEVEL: METHODOLOGY, APPLICATION RESULTS, PROSPECTS (ON THE EXAMPLE OF KAMCHATKA).....	83
Sakhno A., Lebedev S. PROSPECTS FOR USING A DIGITAL ELEVATION MODEL FOR SOLVING APPLIED PROBLEMS OF GEOLOGY AND GEOPHYSICS.....	93

Svergun E., Zimin A., Lazutkina E. MANIFESTATIONS OF INTERNAL WAVES OF THE KURIL-KAMCHATKA REGION IN WINTER AND SUMMER ACCORDING TO SATELLITE OBSERVATIONS.....	100
Serykh I., Kostianoy A., Lebedev S., Kostianaia E. ON INTERDECADAL CHANGES IN AIR TEMPERATURE NEAR THE SURFACE IN THE WHITE SEA REGION.....	105
Sirotyuk E., Gunina G., Shadzhe A. DISTRIBUTION AND VARIABILITY OF MORPHOPARAMETERS OF SPECIES OF THE GENUS <i>GALANTHUS</i> L. IN THE REPUBLIC OF ADYGEA...	115
Sirotyuk E., Khiryaynov V. THE MAIN DIRECTIONS OF RESEARCH OF THE SPECIES OF THE GENUS <i>CEPHALANTHERA</i> RICH...	121
Skafarik A., Kiseleva S. THE POTENTIAL OF USING MICROGENERATION BASED ON SOLAR ENERGY IN THE REGIONS OF RUSSIA.....	127
Skorokhod A. ACTUAL PROBLEMS OF ATMOSPHERIC CHEMISTRY IN THE IAP RAS STUDIES.....	137
Tretyak I., Lebedev S. METHODS FOR ASSIMILATION OF OBSERVATION DATA IN MATHEMATICAL MODELS OF GEOPHYSICAL HYDRODYNAMICS.....	139
Khatko Z., Tamahina M. THE USE OF PECTIN SUBSTANCES IN THE PRODUCTION OF SEMI-FINISHED PRODUCTS WITH A LONG SHELF LIFE.....	145
Cherepantsev A. PATTERNS OF FAULTS FORMATION IN THE OFC EARTHQUAKE MODEL.....	152
Chernova N., Kiseleva S. COMPARATIVE EVALUATION OF PYROLYSIS AND HYDROTHERMAL LIQUEFACTION TECHNOLOGIES FOR OBTAINING ENERGY PRODUCTS FROM MICROALGAE.....	157
Shakun V., Rafikova Yu., Kiseleva S. APPLICATION OF OPEN GIS TOOLS TO THE DEVELOPMENT OF RESOURCE MAPS AND ACCESSIBILITY OF TERRITORIES FOR SOLAR AND WIND ENERGY FACILITIES.....	164
Shtabkin Yu., Moiseenko K., Skorokhod A. SEASONAL VARIATIONS OF NEAR-SURFACE METHANE CONCENTRATION IN ARCTIC: OBSERVATIONS AND MODEL SIMULATION.....	170
Ekba Ya., Pachuliya E. STUDY OF CHARACTERISTICS OF METEOROLOGICAL FORMATIONS (CYCLONES AND ANTI-CYCLONES) IN THE TERRITORY OF ABKHAZIA.....	178
Ekba Ya., Akhsalba A., Khintuba L. ASSESSMENT OF THE IMPACT OF POWERFUL VOLCANOES ON THE TEMPERATURE OF THE PSV IN THE CAUCASUS.....	187

Yanina T., Romanyuk B., Sorokin V. CLIMATE CHANGE AND LEVEL FLUCTUATIONS IN THE THE CASPIAN SEA: A RETROSPECTIVE ANALYSIS FOR THE HOLOCENE.....	196
Yanina T.A., Bolikhovskaya N.S., Sorokin V.M. ATELIAN REGRESSION IN THE CASPIAN SEA AS REFLECTION OF CLIMATE CHANGE DURING THE LATE PLEISTOCENE.....	198

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЗОННОЙ И МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИНДЕКСА NDVI НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АДЫГЕЯ

^{1,2,3}С.А. Лебедев, ^{4,5}А.Г. Костяной, ⁵П.Н. Кравченко, ¹О.П. Шевякова
sergey_a_lebedev@mail.ru; kostianoy@gmail.com; pavel-tversu@yandex.ru;
schev-olga@yandex.ru

¹Геофизический центр РАН, Россия, г. Москва

²Майкопский государственный технологический университет, Россия, г. Майкоп

³Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, г. Москва, г. Зеленоград

⁴Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова, Россия, г. Москва

⁵Московский университет им. С.Ю. Витте, Россия, г. Москва

Аннотация. Определение естественной продуктивности земель и постоянный мониторинг их использования требуют качественно нового технического обеспечения и использования более совершенных методов оперативной оценки состояния земель, определения качества растительного покрова и урожайности выращиваемых культур. В статье рассмотрены различные подходы к решению данной проблемы. В статье рассматриваются различные подходы к решению этой проблемы. Основное внимание уделяется анализу пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости Нормализованного разностного индекса растительности (NDVI) на территории Республики Адыгея.

Ключевые слова. NDVI, продуктивность земель, Республика Адыгея, дистанционное зондирование, сезонная изменчивость, растительный покров

Введение

Сельскохозяйственное производство в Республике Адыгея является основной отраслью экономики, определяющей экономический потенциал региона, занятость большей части населения и уровень его жизни [9, 3]. Эта сфера производства оказывает существенное влияние не только на экономику, но и на всю окружающую природу.

Забота о природных ресурсах и рациональном их использовании требует постоянного мониторинга всех территорий, где осуществляется тот или иной вид хозяйственной деятельности человека. Комплексная оценка земельных и водных ресурсов может распространяться не только на используемые и потенциально пригодные для сельскохозяйственного производства территории [17], но и на особо охраняемые природные территории, где возникает необходимость в реабилитации нарушенных земель [10].

Экстенсивный характер использования сельскохозяйственных земель, получивший распространение в Республике Адыгея, как и во многих регионах России в последние двадцать лет, часто приводит к деградации почв и развитию эрозионных процессов [20]. Ярким примером такого явления является развитие опустынивания в некоторых районах Астраханской и Волгоградской области, в республиках Калмыкия, Дагестан и Хакасия, где на

месте ранее продуктивных естественных пастбищ возникли полупустыни, подверженные ветровой и водной эрозии [6].

Полная инвентаризация земель, находящихся в пользовании, и выявление земель, пригодных для сельскохозяйственного производства, комплексная оценка почвенного и растительного покрова, оценка гидрологических условий и постоянный мониторинг природопользования на больших территориях в настоящее время невозможны без применения новых технических средств. К таковым в настоящее время относят дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) с борта специальных космических аппаратов (спутников) и воздушных летательных аппаратов, позволяющие обследовать в периодическом режиме с разной частотой огромные территории и небольшие участки Земли [1, 2].

Методы ДЗЗ в настоящее время широко используются в агропромышленном комплексе многих стран мира (России, США, Канада, страны Евросоюза, Индия, Япония и др.). Наиболее известным примером действующих систем сельскохозяйственного мониторинга можно отнести проект MARS (The Monitoring of Agriculture with Remote Sensing), реализуемые Объединенным исследовательским центром Еврокомиссии по мониторингу сельскохозяйственных земель [15]. Используемые этим центром данные ДЗЗ и соответствующее программное обеспечение позволяют определять площади земель и посевов, состояние растений и урожайность сельскохозяйственных культур. Результаты обработки данных ДЗЗ используются для прогноза урожаев различных культур и потенциальной степени наполнения рынка. Все это позволяет выработать меры по стабилизации уровня доходности сельскохозяйственных производителей через применения гибкой системы цен, квот и экспортно-импортных отношений, корректировать налоговую политику [8].

В России разрабатывается национальная Космическая система дистанционного зондирования Земли для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения. Работа ведется в рамках Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия (2013–2020 гг.), утверждённая постановлением Правительства от 14 июля 2012 года № 717.

Спектральные индексы

Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн (рис. 1). Знания о связи структуры и состояния растительности с ее спектрально отражательными способностями позволяют использовать данные дистанционного зондирования для картографирования и идентификации типов растительности и их стрессового состояния.

Однако получить полную спектральную характеристику методом ДЗЗ сложно и очень дорого. Существующие на сегодня приборы ДЗЗ имеют не более 15 каналов или спектральных зон, по которым производятся измерения [5], работающие в диапазоне длин волн электромагнитного излучения от 0,2 мкм (ультрафиолетовое излучение) до 3 м (ультракоротких радиоволн).

Участок оптических длин волн (0,2 нм – 1 мкм) включает ультрафиолетовый интервал (0,29–0,40 мкм), видимый (0,40–0,75 мкм) и инфракрасный (0,75–100 мкм) поддиапазоны. В свою очередь диапазон инфракрасного излучения обычно еще подразделяют на ближний 0,75–1,3 мкм, средний 1,3–3,5 мкм и дальний (тепловой) 3,5–100 мкм. Тем не менее, им не хватает спектрального диапазона и точности для классификации объектов и растительности, которую могут обеспечить только гиперспектральные сенсоры [14]. Способность гиперспектральных сенсоров вести съемку в сотнях спектральных полос увеличивает стоимость съемки с борта космических аппаратов и сложность при рассмотрении огромного количества полученных данных.

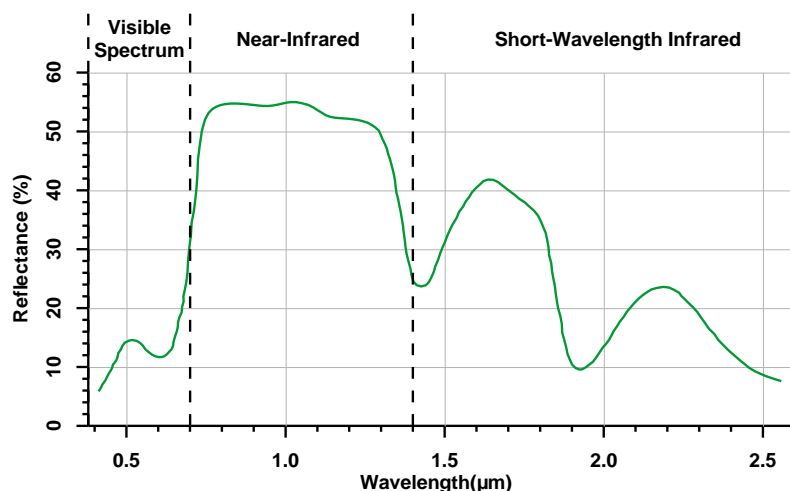


Рис. 1. Спектральная отражательная способность высших сосудистых растений [19]

По этой причине в современных системах мониторинга окружающей среды по данным ДЗЗ прибегают к созданию так называемых *индексных* изображений. На основе комбинации значений яркости в определенных спектральных каналах, информативных для выделения исследуемого объекта, рассчитывается *спектральный индекс*, что позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состояние. *Спектральные индексы*, используемые для изучения и оценки состояния растительности, получили общепринятое название *вегетационных индексов*.

В настоящее время существует около 160 вариантов вегетационных индексов [22]. Они подбираются экспериментально (эмпирическим путем), исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв. Наиболее подробно вегетационные индексы рассмотрены в работе [21]. В его работе дается ряд основополагающих ответов на понятие вегетационного индекса, и при этом, дал развернутый аналитический обзор с подробной классификацией типов вегетационных индексов.

Расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках кривой спектральной отражательной способности растений (Рис. 1). На красную зону спектра (0,62–0,75 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону (0,75–1,3 мкм) максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. Т.е. высокая фотосинтетическая

активность (связанная, как правило, с большой фитомассой растительности) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной. Как это хорошо известно, отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от прочих природных объектов. Использование же не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений как различия в освещенности снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и пр.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) – простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом). Один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова и различных природных и искусственных объектов (табл. 1) [12, 13].

Таблица 1

Значение NDVI для различных природных и искусственных объектов [12, 13]

Тип объекта	Отражение в красной области спектра	Отражение в инфракрасной области спектра	Значение NDVI
Густая растительность	0,1	0,5	0,7
Разряженная растительность	0,1	0,3	0,5
Открытая почва	0,25	0,3	0,025
Облака	0,25	0,25	0
Снег и лед	0,375	0,35	-0,05
Вода	0,02	0,01	-0,25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0,3	0,1	-0,5

Вычисляется по следующей формуле

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

где, *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра, *RED* – отражение в красной области спектра. NDVI изменяется в пределах от -1 до 1. Как правило, для задач, связанных с картографированием растительности используют масштабированную шкалу. Для масштабирования используется следующая формула:

$$NDVI_{scaled} = 100 \cdot (NDVI + 1).$$

Растительный покров Республики Адыгея

Отличительной чертой растительности Республики Адыгеи является ее широтное и поясное размещение (рис. 2) [4]. В равнинной части распространены степная и лесостепная зоны. С подъемом в горы они закономерно сменяются на горно-лесной пояс, субальпийские и альпийские луга, субнивальная растительность скал и осыпей.

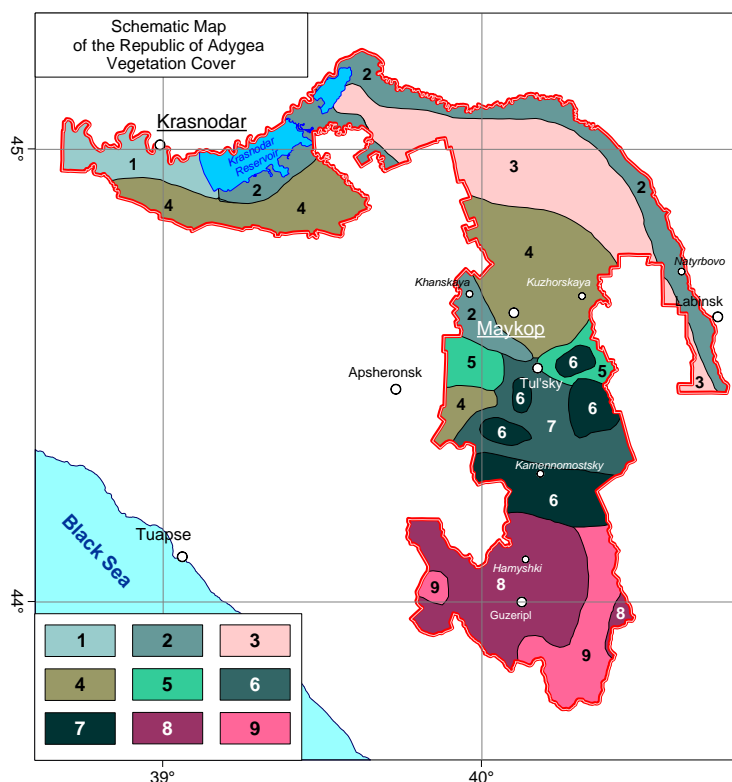


Рис. 2. Карта-схема растительного покрова Республики Адыгея по данным [19].

- 1 – Плавни и лугово-болотные комплексы, местами распаханые
- 2 – Пойменные луга, частью с деревьями и кустарниками, местами распаханые
- 3 – Предгорные остепненные луга и луговые степи, большей частью распаханые
- 4 – Обезлесенные пологие склоны и шлейфы с редкими группами деревьев и кустарников
- 5 – Дубовые леса с преобладанием дуба летнего
- 6 – Дубовые леса с преобладанием дуба зимнего
- 7 – Широколиственные леса с преобладанием бука
- 8 – Пихтовые, пихтово-еловые леса
- 9 – Субальпийские луга, большей частью в сочетании с зарослями рододендрона, с криволесьями редколесьями

Степная зона занимает относительно узкую полосу Закубанской наклонной равнины. В настоящее время почти все степи распаханы и заняты антропогенными сельскохозяйственными ландшафтами. На полях выращиваются зерновые и другие сельскохозяйственные культуры. Лишь в труднодоступных местах встречаются типично степные растения. На участках с более влажными почвами в травостой входят короткокорневищные злаки.

Лесостепь занимает равнинную часть междуречья Белой и Лабы. Возникла она, вероятно, в результате вырубki дубовых лесов, которые еще в первой половине XIX столетия покрывали все левобережье реки Кубани. В настоящее время степные участки почти полностью распаханы. Лесная растительность лесостепной зоны приурочена к пониженным участкам местности и долинам рек. По составу они являются смешанными широколиственными. В них богатый травяной покров.

Поймы рек сопровождаются пойменными лесами, заливными лугами, участками лугово-болотной растительности. Пойменные леса левых притоков Кубани чрезвычайно разнообразны. Леса заливаемой части поймы характеризуются пестротой состава древостоя и редким травяным покровом.

Предгорно-лесостепная широтная зона южнее г. Майкопа постепенно переходит в ландшафты высотных поясов.

Лесной пояс расчленяется на низкогорные (300–500 м над уровнем моря) и среднегорные (1000–2000 м), высокогорные (от 1000–1200 до 1800–2000 м) леса. На высоте 450–500 м дубовые леса сменяются поясом буковых лесов. Произрастают также дуб скальный и граб кавказский.

В среднегорье распространены буково-пихтовые и пихтовые леса. В высокогорные темнохвойные леса проникает ель восточная – это западный край ее ареала.

Высоту 1700–2000 м на границе горных лесов и субальпийских лугов узкой полосой обрамляет березовое и буковое криволесье. Субальпийские луга (1800–2500 м) очень разнообразны по составу. Здесь на границе с лесом развивается высокотравье – сообщество гигантских трав, достигающих 2–3 м высоты. Альпийский пояс простирается с высот 2000–2400 до 2600–2800 м. Субнивальный и нивальный пояса начинаются выше 2900–3000 м. Здесь встречаются лишь пятна лишайников, мхов, специфических растений скал и осыпей.

Изменчивость индекса NDVI

Традиционно составление карт растительного покрова производилось на основе данных полевых исследований на ключевых участках и экстраполяции полученных результатов на участки со сходными физико-географическими характеристиками. Однако сочетание наземных исследований растительного покрова с анализом данных ДЗЗ позволяет создавать карты более высокой точности, чем при использовании только одного полевых исследований [1]. Это позволило создать карты распределения на Западном Кавказе лесных сообществ с доминированием определенных видов деревьев, определена современная граница сплошных лесных массивов, а также размещение и форма обезлесенных участков в их пределах, которые, могут представлять для экологов самостоятельный интерес. В частности, как основа для мониторинга лесной растительности и экологических исследований различного профиля.

Анализ изменчивости индекса NDVI, рассчитанного по отдельным снимкам Operational Land Imager спутника Landsat-8, показал соответствие данных полевых исследований и данных ДЗЗ. Индекс NDVI рассчитывался по данным канала 4 *RED* (0,64–0,67 мкм) и канала 5 *NIR* (0,85–0,88 мкм) с пространственным разрешением 30 м.

Сезонная и межгодовая изменчивость

Для анализа сезонной и межгодовой изменчивости индекса NDVI территория Республики Адыгея в соответствии с цифровой моделью рельефа [18] была разбита на три части (рис. 3): I – равнинная часть с высотой рельефа менее 150 м, II – предгорная часть с высотой рельефа в пределах 150–400 м, III – горная часть с высотой рельефа более 400 м.

Для исследования были выбраны данные проекта PROBA-V (PROBA-Vegetation), который объединил в себе данные ДЗЗ в видимом диапазоне спутников серии SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) с 1999 по настоящее время [11]. Мы использовали данные NDVI с пространственным разрешением 300 м.

Анализ показал, что для всех частей изменчивость индекса NDVI носит ярко выраженный сезонный характер (рис. 4, 5).

Изменчивость индекса NDVI в равнинной части

В равнинной части среднее многолетнее минимальное значение индекса NDVI 0,3360 наблюдается зимой (рис. 4) (табл. 2). Это связано с тем, что

данный регион является сельскохозяйственным (более 88% от площади [18]), где в это время года большинство полей и рисовые чеки находятся под паром, т.е. вспаханы.

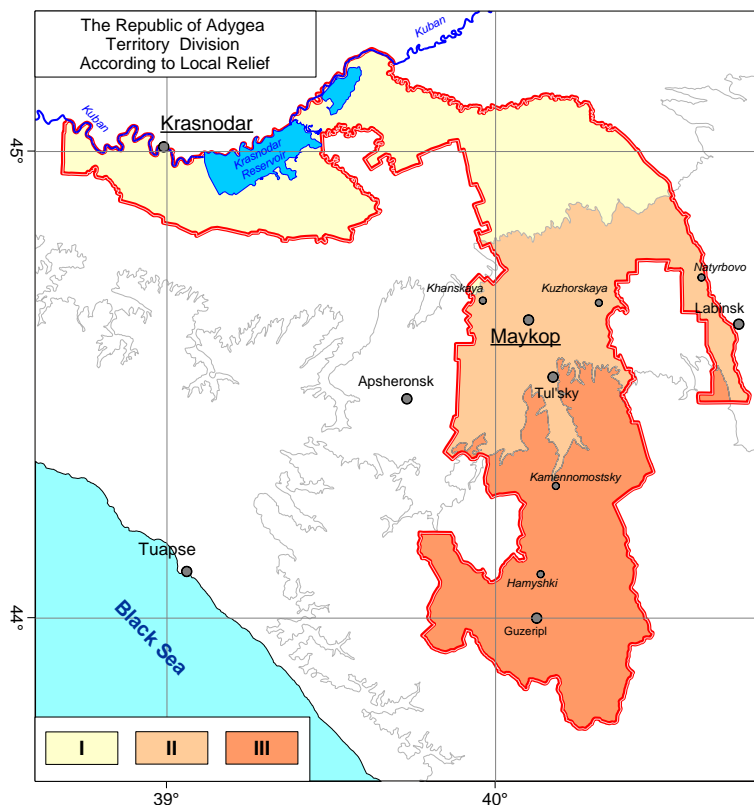


Рис. 3. Деление территории Республики Адыгея по рельефу [18]:

I – равнинная часть с высотой рельефа менее 150 м,
 II – предгорная часть с высотой рельефа в пределах 150-400 м,
 III – горная часть с высотой рельефа более 400 м

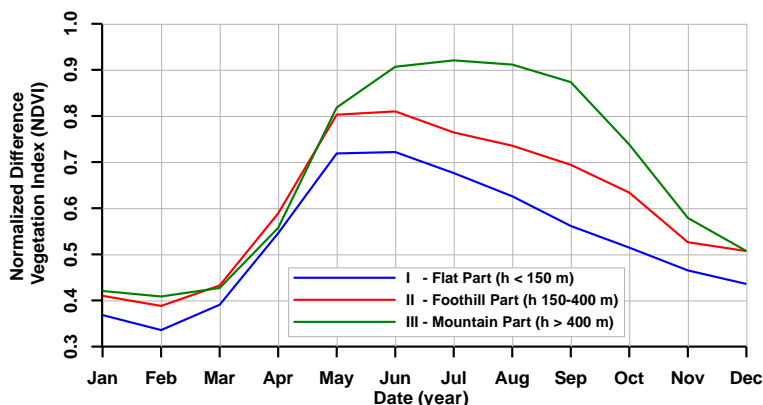


Рис. 4. Сезонная изменчивость индекса NDVI для разных регионов Республики Адыгея [19]

Средняя температура воздуха зимой (декабрь–февраль) в этом регионе составляет $-2,9^{\circ}\text{C}$. Продолжительность зимнего периода составляет около 53 дней: в среднем с 24 декабря по 15 февраля, для которого характерны значительные и продолжительные оттепели [16]. По этой причине индекс NDVI зимой (декабрь–февраль) изменятся в пределах 0,2095–0,5663 (рис. 5a) (табл. 2). В период с 1999 по 2019 годы минимальное значение индекса NDVI 0,2095 наблюдалось в феврале 2012 г., а максимальное – 0,5663 в декабре 2003 г. Зима 2011–2012 была одной из самых холодных. Дневные температуры опускались до -13°C , а ночные – до -19°C . Зима 2002–2003 одной из теплых зим за период с 1999 по 2019 гг. Отсутствие снежного покрова и теплая зима позволили озимым (основной сельскохозяйственной культуре данного

региона) развиваться более активно и иметь большую фитомассу, на что указывает высокое значение индекса NDVI.

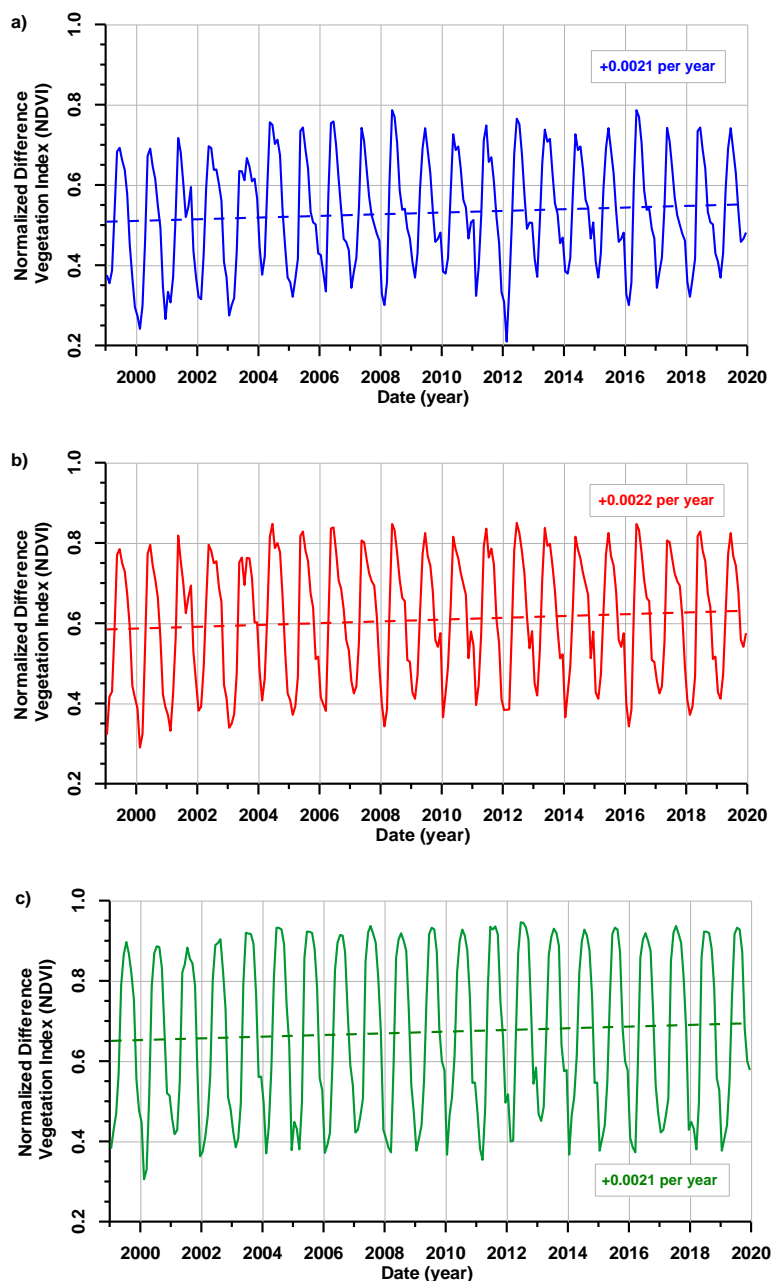


Рис. 5. Временная изменчивость индекса NDVI для разных регионов Республики Адыгея: (а) – равнинная часть с высотой рельефа менее 150 м, (б) – предгорная часть с высотой рельефа в пределах 150–400 м, (в) – горная часть с высотой рельефа более 400 м [19]

Начиная с февраля по май индекс NDVI стремительно растет со скоростью 0,1304 в месяц и достигает среднего многолетнего максимального значения индекса NDVI 0,7220 в июне (Рис. 4) (Таблица 2).

Средняя температура воздуха летом (июль–август) +22.9°C [16]. Благоприятные погодные условия стимулируют активный рост биомассы сельскохозяйственных культур. Летом (июнь–август) индекс NDVI изменяется в пределах 0,5201–0,7695 (табл. 2). За период с 1999 по 2019 годы минимальное значение индекса NDVI 0,5201 наблюдалось в августе 2001 г., а максимальное –

0,7695 в июне 2008 г. Лето 2001 за период с 1999 по 2019 годы было более засушливое, что привело к самому низкому значению индекса NDVI. Летом 2008 года температура воздуха изменялась в пределах 21–36°C днем и 19–31°C ночью, что в совокупности с осадками (378 мм) позволило сельскохозяйственным культурам активно набирать фитомассу.

Таблица 2

Экстремальные и средние среднемесячные значения индекса NDVI для различных регионов Республики Адыгея [19]

Месяц	Равнинная часть (высота рельефа < 150 м)			Предгорная часть (высота рельефа 150–400 м)			Горная часть (высота рельефа > 400 м)		
	Минимум	Среднее	Максимум	Минимум	Среднее	Максимум	Минимум	Среднее	Максимум
Январь	0,2734	0,3685	0,5128	0,3221	0,4102	0,5447	0,3669	0,4205	0,5173
Февраль	0,2095	0,3360	0,3835	0,2901	0,3882	0,4262	0,3056	0,4087	0,4645
Март	0,2988	0,3909	0,5065	0,3236	0,4325	0,5288	0,3299	0,4271	0,5096
Апрель	0,4161	0,5459	0,6545	0,4669	0,5888	0,7100	0,4807	0,5575	0,6623
Май	0,6347	0,7189	0,7865	0,7517	0,8029	0,8471	0,7594	0,8185	0,8690
Июнь	0,6340	0,7220	0,7695	0,7562	0,8101	0,8502	0,8414	0,9069	0,9458
Июль	0,6056	0,6764	0,7514	0,6951	0,7642	0,8243	0,8829	0,9208	0,9445
Август	0,5201	0,6259	0,7129	0,6252	0,7357	0,7998	0,8553	0,9115	0,9357
Сентябрь	0,5246	0,5615	0,6741	0,6629	0,6941	0,7767	0,8200	0,8735	0,9155
Октябрь	0,4494	0,5146	0,6090	0,5584	0,6340	0,7112	0,6410	0,7382	0,8081
Ноябрь	0,3463	0,4651	0,6157	0,4223	0,5263	0,6163	0,5099	0,5790	0,6739
Декабрь	0,2657	0,4359	0,5663	0,3901	0,5072	0,6018	0,3630	0,5072	0,5841

С июля и по ноябрь индекс NDVI медленно падает со скоростью -0.0524 в месяц и достигает среднего многолетнего минимума зимой (рис. 4) (табл. 2).

Межгодовая изменчивость индекса NDVI является положительной и составляет $+0,0021$ в год (рис. 5а).

Изменчивость индекса NDVI в предгорной части

В предгорной части среднее многолетнее минимальное значение индекса NDVI 0,3882 также наблюдается зимой (рис. 4) (табл. 2). Однако он выше, чем в равнинной части, потому что кроме земель сельскохозяйственного назначения и пастбищ (около 80% от площади [11]) здесь расположены заросли многолетних кустарников и широколиственные леса (рис. 2).

Средняя температура воздуха зимой (декабрь–февраль) в этом регионе составляет $-2,4^{\circ}\text{C}$. Продолжительность зимнего периода составляет около 69 дней: в среднем с 30 ноября по 8 февраля, для которого также характерны значительные и продолжительные оттепели [16].

Зимой (декабрь–февраль) индекс NDVI изменяется в пределах 0,2901–0,6018 (рис. 5b) (табл. 2). В период с 1999 по 2019 годы минимальное значение индекса NDVI 0,2901 наблюдалось в феврале 2000 г., несмотря на то, что зима 1999–2000 была одной из самых тёплых в данном регионе. Дневные температуры опускались до -5°C , а ночные – до -10°C . Максимальное значение индекса NDVI 0,6018 наблюдалось в декабре 2003 г. Зима 2003–2004 была также одной из тёплых зим за период с 1999 по 2019 гг. Отсутствие снежного покрова и тёплая зима позволили более активно развиваться озимым сельскохозяйственным культурам и наращивать фитомассу.

Начиная с февраля по май индекс NDVI стремительно растет со скоростью 0,14 в месяц и достигает среднего многолетнего максимального значения индекса NDVI 0,8101 в июне (рис. 4) (табл. 2).

Средняя температура воздуха летом (июль–август) +22,3°C [16]. Благоприятные погодные условия стимулируют активный рост биомассы сельскохозяйственных культур и широколиственных лесов. Летом (июнь–август) индекс NDVI изменяется в пределах 0,6252–0,8502 (табл. 2). За период с 1999 по 2019 гг. минимальное значение индекса NDVI 0,6252 наблюдалось в августе 2001 г., а максимальное – 0,8502 в июне 2012 г. Как уже отмечалось, лето 2001 г. было более засушливое за период с 1999 по 2019 гг., что также привело к самому низкому значению индекса NDVI как и в равнинной части. Летом 2012 г. температура воздуха изменялась в пределах 19–36°C днем и 16–29°C ночью, что в совокупности с осадками (352 мм) позволило сельскохозяйственным культурам и широколиственным деревьям активно набирать фитомассу.

С июня и по ноябрь индекс NDVI медленно падает со скоростью -0,0529 в месяц и достигает среднего многолетнего минимума зимой (рис. 4) (табл. 2).

Межгодовая изменчивость индекса NDVI также является положительной и составляет +0.0022 в год (рис. 5b), что чуть выше, чем в равнинной части.

Изменчивость индекса NDVI в горной части

В горной части среднее многолетнее минимальное значение индекса NDVI 0,0487 также наблюдается зимой (рис. 4) (табл. 2). Однако он выше, чем в других частях, потому что здесь в основном расположены дубовые, широколиственные, пихтовые и пихтово-еловые леса, а также заросли многолетних кустарников вдоль речных пойм (рис. 2).

На расстоянии от Майкопа (210 м над у.м.) до Гузерипля (760 м над у.м.) средняя месячная температура зимой снижается с -1.7°C до -2.2°C [16].

Зимой (декабрь–февраль) индекс NDVI изменяется в пределах 0.3056–0.5841 (рис. 5c) (табл. 2). В период с 1999 по 2019 гг. минимальное значение индекса NDVI 0,3056 наблюдалось в январе 2000 г., несмотря на то, что зима 1999–2000 была одной из самых тёплых в данном регионе. Дневные температуры опускались до -9°C, а ночные – до -21°C. Максимальное значение индекса NDVI 0,5841 наблюдалось в декабре 2012 г. Зима 2011–2012 была также одной из теплых зим за период с 1999 по 2019 гг.

Начиная с февраля по июнь индекс NDVI стремительно растет со скоростью 0,17 в месяц и достигает среднего многолетнего максимального значения индекса NDVI 0,9208 в июле (рис. 4) (табл. 2).

Средняя температура воздуха летом (июль–август) +19,2°C [16]. Благоприятные погодные условия стимулируют активный рост биомассы лесов, расположенных на склонах невысоких гор. Летом (июнь–август) индекс NDVI изменяется в пределах 0,8414–0,9458 (табл. 2). За период с 1999 по 2019 годы минимальное значение индекса NDVI 0,8414 наблюдалось в июне 2001 г., а максимальное – 0,9458 в июне 2012 г.

С июня и по ноябрь индекс NDVI медленно падает со скоростью $-0,1103$ в месяц и достигает среднего многолетнего минимума зимой (рис. 4) (табл. 2).

Межгодовая изменчивость индекса NDVI также является положительной и составляет $+0.0021$ в год (рис. 5с), так же как и в равнинной части.

Заключение

Использован для исследования пространственной и временной изменчивости растительного покрова в Республике Адыгея был использован нормализованный индекс изменчивости растительности (NDVI), полученный на основе данных дистанционного зондирования.

Сезонная и межгодовая (1999–2019 гг.) изменчивость индекса NDVI для территории Республики Адыгея исследовалась отдельно для трех частей республики: 1) равнинная часть с высотой рельефа менее 150 м; 2) предгорная часть с высотой рельефа в пределах 150–400 м; 3) горная часть с высотой рельефа более 400 м. Для этого исследования были выбраны спутниковые данные SPOT проекта PROBA-V (PROBA-Vegetation) с пространственным разрешением 300 м. Анализ показал, что для всех участков территории Республики Адыгея изменчивость индекса NDVI имеет ярко выраженный сезонный характер, связанный как с естественной сезонной изменчивостью растительного покрова, так и с сезонной изменчивостью сельскохозяйственной деятельности. Особенности межгодовой изменчивости NDVI (максимальные и минимальные значения в разные сезоны) связаны с известными случаями мягкой или холодной зимы, а также с засушливым/жарким или влажным летом 1999–2019 гг. В целом, все три части республики демонстрируют положительную динамику изменчивости NDVI на $0,0021$ в год (или увеличение примерно на 10% за последние 20 лет), что, вероятно, объясняется потеплением регионального климата, благоприятствующим хорошему состоянию. и прогрессивное развитие растительного покрова.

Дальнейшие исследования NDVI для Республики Адыгея очень многообещающие и должны проводиться в тесном сотрудничестве со специалистами в области сельского хозяйства, лесного хозяйства, ботаники и другими экспертами в области земельного и растительного покрова. Практические приложения должны быть сосредоточены на разработке системы сельскохозяйственного мониторинга, которая будет включать методы дистанционного зондирования Земли с высоким разрешением, для агропромышленного комплекса Республики Адыгея. Это позволит определить площади земель и посевов, состояние растений и урожайность сельскохозяйственных культур. Прогноз урожайности различных культур будет иметь большое значение для Правительства республики с целью контроля потенциальной степени наполнения рынка и разработки мер по стабилизации уровня рентабельности сельхозпроизводителей.

Работа С.А. Лебедева (обработка спутниковых данных) была выполнена в рамках бюджетного финансирования Геофизического центра РАН и проекту РФФИ № 19-55-80021_БРИКС.

Список литературы

1. Акатов П.В., Варшанина Т.П. Современная граница лесов на западном Кавказе (в пределах Краснодарского края и Республики Адыгея) //Экологический вестник Северного Кавказа. – 2013. – Т. 9. – №. 3. – С. 86-88.
2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. – М.: ИКИ, 2016. – 208 с.
3. Беданокков М.К., Шамбалева Г.В. Прогнозы развития сельскохозяйственного производства в Республике Адыгея //Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Общественные науки. – 2003. – №. 2. – С. 85-87.
4. Бузаров А.С., Варшанина Т.П., Кабаян Н.В., Краснопольский А.В., Краснопольская Н.В., Куашева Д.А., Мельникова Т.Н., Спесивцев П.А., Хачегого А.Ю., Шебзухова Е.А. География Республики Адыгея. – Майкоп: Адыгейское республиканское книжное издательство, 2001. – 200 с.
5. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. – М.: ИКИ, 2011. – 480 с.
6. Трофимов И.А., Шамсутдинов З.Ш., Трофимова Л.С., Шамсутдинова Э.З., Яковлева Е.П., Орловский Н.С. Проблема опустынивания земель в России //Земледелие. – 2010. – №. 7. – С. 7-9.
7. Baghdadi N, Zribi M Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest. – ISTE Press – Elsevier, 2016. – 496 pp. doi:10.1016/C2015-0-01224-2.
8. Baruth B., Royer A., Klisch A., Genovese G. The use of remote sensing within the MARS crop yield monitoring system of the European Commission // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2008. – Vol. 27. – № B8. – P. 935-940.
9. Bedanokov M.K., Chich S.K., Chetyz D.Y., Trepet S.A., Lebedev S.A., Kostianoy A.G. Physicogeographical Characteristics of the Republic of Adygea. /The Republic of Adygea Environment //Eds. M.K. Bedanokov, S.A. Lebedev, A.G. Kostianoy. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – P. 19-55. doi: 10.1007/698_2020_637.
10. Bibin A.R., Trepet S.A., Grabenko E.A., Akatova T.V. Shaposhnikov Caucasian State Nature Biosphere Reserve /The Republic of Adygea Environment //Eds. M.K. Bedanokov, S.A. Lebedev, A.G. Kostianoy. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – P. 603-631. doi: 10.1007/698_2020_636
11. Dierckx W., Sterckx S., Benhadj I., Livens S., Duhoux G., Van Achteren T., Francois M., Mellab K., Saint G. PROBA-V mission for global vegetation monitoring: standard products and image quality //International Journal of Remote Sensing. – 2014. – Vol. 35. – № 7. – P. 2589-2614. doi: 10.1080/01431161.2014.883097.
12. Horning N., Robinson J.A., Sterling E.J., Turner W., Spector S. Remote sensing for ecology and conservation: A handbook of techniques. – Oxford, New York: Oxford University Press, 2010. – 496 pp.
13. Justice C.O., Holben B.N., Gwynne M.D. Monitoring East African vegetation using AVHRR data //International Journal of Remote Sensing. – 1986. – Vol. 7. – № 11. – P. 1453-1474. doi: 10.1080/01431168608948945.
14. Khan MJ, Khan HS, Yousaf A, Khurshid K, Abbas A (2018). Modern trends in hyperspectral image analysis: A review //IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 14118-14129. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2812999.
15. King D., Jones R.J.A., Thomasson A.J. European land information systems for agro-environmental monitoring. – European Commission, 1995. – 285 pp.
16. Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Serykh I.V., Kostianaia E.A., Varshanina T.P. General Characteristics of the Climate in the Republic of Adygea /The Republic of Adygea

Environment //Eds. M.K. Bedanokov, S.A. Lebedev, A.G. Kostianoy. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – P. 289-309. doi: 10.1007/698_2021_735.

17. Lebedev S.A., Gunina G.N., Ashinov Y.N., Kravchenko P.N. Ecological Conditions of Soils in the Republic of Adygea /The Republic of Adygea Environment //Eds. M.K. Bedanokov, S.A. Lebedev, A.G. Kostianoy. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – P. 145-166. doi: 10.1007/698_2020_640

18. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Kravchenko P.N. Digital Elevation Model of the Republic of Adygea. /The Republic of Adygea Environment //Eds. M.K. Bedanokov, S.A. Lebedev, A.G. Kostianoy. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – P. 57-83. doi: 10.1007/698_2020_656.

19. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Kravchenko P.N., Shevyakova O.P. Seasonal and Interannual Variability of NDVI in the Republic of Adygea /The Republic of Adygea Environment //Eds. M.K. Bedanokov, S.A. Lebedev, A.G. Kostianoy. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – P. 443-460. doi: 10.1007/698_2021_742.

20. Lebedev S.A., Sirotyuk E.A., Shkhatsev A.K., Kravchenko P.N. Ecological State of Soils of the Republic of Adygea Under High Anthropogenic Load /The Republic of Adygea Environment //Eds. M.K. Bedanokov, S.A. Lebedev, A.G. Kostianoy. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – P. 185-216. doi: 10.1007/698_2021_741

21. Ray T.W. A FAQ on vegetation in remote sensing. – California: Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, 1994. – 18 pp.

22. Xue J, Su B. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. //Journal of sensors. – 2017. – Vol. 2017. doi: 10.1155/2017/1353691.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ ПРОВИНЦИЙ ИСПАНИИ

Е.Ф. Лернер

len.ler1903@gmail.com

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

В настоящее время в мире дисбаланс между растущими потребностями в воде и возможностями их удовлетворения постоянно нарастает. Для Испании, одной из самых засушливых европейских стран, эта проблема является очень актуальной. Поэтому для повышения эффективности использования водных ресурсов требуются комплексная оценка водообеспеченности Испании и факторов ее трансформации [3].

Для изучения основных природных факторов формирования и распределения водных ресурсов по территории Испании были использованы географические информационные системы Министерства окружающей среды Испании, статистические базы данных [1, 5, 6, 7], архивы многолетних наблюдений [2, 4].

Расчет количественных показателей по территории проводился средствами программного пакета ArcMap. Картографические изображения, полученные на основе данных Министерства Экологии Испании [7], содержали информацию о подземном, поверхностном и трансграничном стоке, количестве осадков, испарении и испаряемости на территории Испании.

По показателям удельной водообеспеченности в соответствии с методикой индексирования водного стресса Фалкенмарк, провинции были подразделены на 4 категории.

Суммарный сток и удельная водообеспеченность провинций Испании являются универсальными показателями для проведения дальнейшего анализа и районирования. Согласно полученным данным, наличие значительных объемов водных ресурсов не всегда определяет высокие показатели на душу населения. 16 провинций подвержены водному стрессу, а 9 из них имеют значительный вододефицит. Показатели удельной водообеспеченности варьируют от 139 до 20933 м³/чел. в год. При этом медианный показатель водообеспеченности для Испании на порядок ниже мирового, составляющего 7400 м³/чел. в год [2].

Испании 15 млн человек проживают в условиях абсолютного вододефицита, имея менее 500 м³ водных ресурсов в год. Особо ярко данный фактор проявляется в столичном и островных регионах. Около 2,5 млн человек испытывают вододефицит, характерный в основном для южных прибрежных районов. Ещё 6 млн. человек проживают в регионах с водным стрессом. И только менее половины населения Испании проживают в регионах со слабым водным стрессом или его отсутствием.

На основании данных об удельной водообеспеченности 52 провинции страны были объединены в 7 районов, имеющих схожие факторы

формирования стока и осадков, виды хозяйственного освоения и потенциальные факторы трансформации водообеспеченности.

Испания обладает достаточными запасами водных ресурсов, которые распределены по территории неравномерно. Максимальные запасы сосредоточены в северной части страны, которая является наименее населённой. При перемещении в южном направлении увеличиваются показатели испарения, уменьшается количество осадков, возрастают туристический интерес и плотность населения.

Таким образом:

1. При сравнении с мировыми показателями удельной водообеспеченности Испания в целом характеризуется средними значениями, однако велик дисбаланс между северными и южными регионами, в которых данные показатели разнятся более, чем в 25 раз.

2. Территорию Испании можно разделить на 7 районов по условиям удельной водообеспеченности, из них три характеризуются избыточным уровнем водобеспеченности, один имеет достаточные водные ресурсы, два испытывают водный стресс, один – четко выраженный вододефицит.

3. Главными факторами трансформации водообеспеченности являются: изменения климата и их последствия, последствия промышленного водопользования, сельскохозяйственное водопользование, последствия коммунального хозяйства, в том числе колебания спроса на воду и его сезонность. Увеличивается дисбаланс между водными ресурсами и спросом на воду. Главными факторами трансформации водообеспеченности являются: для северных регионов – рост численности населения в городах; для запада и центральной части – уменьшение количества осадков; для юга и юго-востока – рост туристического потока, развитие орошаемого земледелия, климатические изменения.

Список литературы

1. Agencia Estatal de Meteorologia. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aemet.es/es/portada>. – (Дата обращения: 08.12.2020).
2. FAO aquastat. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fao.org/aquastat>. – (Дата обращения: 08.12.2020).
3. Fayanas, E. El agua en España. // Nueva Tribuna – 2011 – P. 3-5.
4. Hispagua. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hispagua.cedex.es/datos/hidrografia#8>. – (Дата обращения: 20.12.2020).
5. Instituto de Estadística. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ine.es/>. – (Дата обращения: 08.01.2020).
6. Ministerio de Medio Ambiente. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.minambiente.gov.co/>. – (Дата обращения: 08.12.2020).
7. Ministerio para la Transición Ecológica. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.miteco.gob.es/>. – (Дата обращения: 08.01.2020).

ОСТАНОВИТЬ УТРАТУ БИОРАЗНООБРАЗИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭКОСИСТЕМ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА И ЗАПАДНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ

С.А. Литвинская

linvinsky@yandex.ru

Кубанский государственный университет, Россия, г. Краснодар

Современный глобальный климатический кризис заставил не только страны, но и регионы обратиться к анализу глубоких экологических проблем. Это стимулировало поиск инструментов оценки биоразнообразия и его экосистемных услуг и для учета этой ценности в качестве предпосылки для сохранения и устойчивого использования. Слабой стороной поиска решения проблемы глобального потепления является недооценка природного углероддепонирующего потенциала, отсутствие оценки стоимости природных экосистем и их экосистемных услуг. Именно обращение к природным решениям может способствовать положительным результатам в области биоразнообразия и достижению углеродно-нейтральных целей. Глобальные меры необходимы для сохранения глобальной окружающей среды. Но каждый регион, являясь частью биосферы, может внести свою лепту в решение этой важной экологической проблемы и реализации устойчивого развития цивилизации.

Западный Кавказ и Западное Предкавказье – уникальная территория по экосистемному и видовому биоразнообразию. В регионе сформировалась богатейшая биота. Большое разнообразие физико-географических условий, геологические процессы создали сложные биогеографические связи с прилегающими к нему территориями. Здесь нашли подходящие условия для существования весьма различные по происхождению виды растений и животных, составляющие генетически специфические комплексы. Последние подвергались эволюционным преобразованиям и составили экологически устойчивые сообщества. По данным на 1970 г. на территории Западного Кавказа и Западного Предкавказья на площади 83,3 тыс. км² (территория Краснодарского края и Республики Адыгея) было отмечено 2813 видов природной флоры [1]. Нашими исследованиями установлено произрастание около 3500 видов сосудистых растений. Показательно, что более 65% редких видов растений, подлежащих охране в РФ сосредоточено на территории рассматриваемого региона.

Регион занимает особое положение в структуре Кавказского экорегиона и России в целом. Высок его международный статус. По природным критериям «ix», «x» с 1999 г. он отнесен к объектам Всемирного наследия ЮНЕСКО в России под названием «Западный Кавказ». Этот объект охватывает около 300 тыс. га в границах Краснодарского края и Республики Адыгея. В целом же территория Западного Кавказа и Западного Предкавказья отнесена к трем глобальным экорегионам WWF и пяти биомам России. Это 2 биома равнин: Неморальные широколиственные и лесостепные (Крымско-Кавказский с подзональным географическим вариантом Кубанская дубовая

лесостепь) и Степные (Причерноморской-Предкавказский с географическим вариантом Приазовско-Предкавказская разнотравно-дерновиннозлаковая степь) и 1 оробиом Неморальные хвойно-широколиственные и широколиственнолесные с тремя географическими вариантами: Северокавказский (Северо-Западнокавказский), Крымско-Новороссийский (Утришский) и Сочинский (субтропический) [2]. Все региональные биомы и их географические варианты отличаются флористическим и фаунистическим богатством и спецификой высотных поясов. Рассмотрим особенности биоразнообразия биомов региона. Флора Сочинского оробиома сформировалась на стыке разных генетических флор - умеренной и субтропической и носит рефугиальный характер. Во всех высотных поясах биома представлен мезофильный элемент (полидоминантные лиственные (колхидские), широколиственные, хвойно-широколиственные леса с вечнозеленым подлеском), обогащенный реликтовыми и эндемичными таксонами. Это самый северный участок Колхидской провинции. Российская часть Колхидского оробиома представляет единый флорогенетический комплекс с флорой южной Колхиды. Во флоре Сочинского геоварианта оробиома прослеживается связь со средиземноморской флорой, влияние, которое усиливается к северо-западу (Туапсинский район) и родство с бореальными флорами, где высокое положение занимают семейства Rosaceae (275 видов), Asteraceae (291 вид), Rosaceae (119 видов). Для Сочинского (субтропического) биома характерно сильное обеднение колхидским элементом, особенно в буковых и буково-пихтовых флорокомплексах, а вечнозеленый подлесок встречается только в южной части. Во флоре скально-лесных комплексов ощущается сильное влияние ксерофильной флоры. Они отличаются особым флористическим составом, в котором много эндемичных кальцефильных видов. С другой стороны, на самом северо-западе оробиома на общем фоне обычных дубовых лесов из дуба грузинского, обедненных колхидскими элементами, на скально-щебнистых субстратах появляются и местами доминируют ксерофильные виды Утришского оробиома. Так, в окрестностях Туапсе произрастают *Genista lipskyi* Novopopokr. et Schischk., *Vupleurum woronowii* Manden., *Salvia ringens* Sibth. et Sm., *Dianthus acantholimonoideus* Schischk. Флористическое разнообразие Сочинского (субтропического) оробиома – 2656 видов сосудистых растений: споровых – 56 видов, однодольных 566 видов, двудольных – 2034, что составляет 74% от флоры всей Колхиды (3596 видов) [3,4,5]. Флора мохообразных (учитывается территория Сочинского национального парка) насчитывает 226 видов листостебельных мохообразных [6], напочвенных лишайников – 167 видов, ихтиофауны – 1 вид круглоротых, 30 видов рыб, герпетофауны – 30 видов, орнитофауны – 234 вида, млекопитающих – 74 вида [6].

Северо-Западнокавказский оробиом занимает северный макросклон северо-западной части Большого Кавказа (Адыгея и Краснодарский край). Территория оробиома располагается на стыке Циркумбореальной и Средиземноморской областей Голарктического царства. Флора типична для горных территорий Циркумбореальной области Голарктики, отличается

значительной гетерогенностью и высокой видовой насыщенностью. По суммарной оценке видового богатства, флора Северо-Западнокавказского биома включает ориентировочно 2400 видов растений, из которых только однодольных 159 родов и 528 видов [3], в Эльбрусский биоме – 2300 видов. Продокус ценотического разнообразия лесных экосистем на территории оробеома в доминантной системе представлен 56 формациями среди которых есть формации, эдификаторами которых являются реликтовые виды (24 формации, 43% от всех важнейших лесных формаций), виды редкие, подлежащие охране в РФ (10 формаций, 18%) и регионе (9, 16%). Известно биоразнообразие отдельных локусов: флора субальпийского пояса бассейна р. Белой включает 1885 видов, из которых эндемичные элементы составляют 433 вида [7], флористическое разнообразие Кавказского государственного биосферного заповедника – более 1700 видов, Сочинского национального парка – 1658 видов [6], Фишт-Оштенского массива и плато Лагонаки – 925 видов, бассейне р. Б. Лаба – 1710 видов, бассейне р. Афиц [8] – 797 видов на площади 1380 км². На Западном Кавказе известно флористическое разнообразие формационных флор *Quercus petraea* L. ex Liebl. - более 580 видов, *Quercus pubescens* Willd. – около 540, *Fagus orientalis* Lipsky – более 400 [9]. Следует отметить значительное участие в лесном покрове древних реликтовых видов, причем они присутствуют во всех высотных поясах, концентрируясь в лесных сообществах Колхидских ворот. Все лесные ценотаксоны оробеома насыщены эндемиками и реликтами: в буковых лесах отмечено 68 реликтов, в скальнодубовых – 50.

Согласно карте «Биомы России» [2], рассматриваемый регион относится к Степному равнинному биому. Степи региона представлены различными типологическими вариациями от ксерофитного варианта разнотравно-типчаково-ковыльных и кустарниковых степей на кубанских черноземах до азональных сухих петрофитных на эродированных перегнойно-карбонатных и коричневых почвах и галофильных на темнокаштановых солонцеватых почвах и псаммофитных вариантов на аккумулятивных формах рельефа (косы, гряды, пересыпи). В современном растительном покрове можно выделить ряд фрагментированных региональных вариантов степной растительности: северо-западнопредкавказские типичные дерновинно-злаковые (ковыльные, келериевые, типчаковые и др.), разнотравно-дерновинно-злаковые (типчаково-разнотравные, житняково-типчаково-разнотравные, келериево-типчаково-разнотравные, злаково-полынные и др.) степи, полупустынные типчаково-полынные с камфоросмой, галофильные степи с солянками и сведами на солонцеватых черноземах, псаммофильный вариант типчаково-ковыльной степи с эфедрой и степным разнотравьем на каштановых супесях, бородачевые степи с субальпийским высокотравьем, эремурсово-ковыльно-разнотравные степи западных отрогов Ставропольской возвышенности [10].

В Степном биоме выделено 2 географических вариантов: Крымско-Кавказский с Кубанской дубовой лесостепью и Причерноморско-Предкавказский с Приазовско-Предкавказской разнотравно-дерновиннозлаковой степью, относящейся к подзоне северных разнотравно-

дерновиннозлаковых степей, восточнопричерноморским разнотравно-типчаково-ковыльным степям с участием дерновинных злаков (*Stipa ucrainica* P.A. Smirn., *S. tirsia* Steven, *S. pennata* L., *S. capillata* L., *S. lessingiana* Trin. et Rupr., *Festuca valesiaca* Schleich. ex Gaudin, *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Bromopsis riparia* (Rehmann) Holub), разнотравья (*Helictotrichon arenarium* (L.) Moench, *Filipendula vulgaris* Moench, *Trifolium montanum* L., *Medicago romanica* Prodan, *Salvia nutans* L., *Euphorbia stepposa* Zoz., *Carex humilis* Leyss.) и кустарниками (*Cerasus fruticosus* (Pall.) Woronow, *Prunus spinosa* L. Равнинные степи региона относятся к классу Festuco-Brometea союзу (Astragalo-Stipion). Зональный Степной биом в регионе занимает 45% территории, плавневый – 10%. Флора степей насчитывает около 850 видов сосудистых растений, флора плавнево-литорального ландшафта р. Кубань – 732 вида, флора Таманского полуострова – 942 вида. Флора мохообразных по экспертным оценкам в предкавказской части биома представлена около 130 видами, видовое богатство лишайников – около 300.

Крымско-Кавказский географический вариант Неморально-широколиственного биома (Кубанская дубовая лесостепь) занимает Таманский полуостров, растительность которого относится к особому провинциальному варианту западнопредкавказских разнотравно-злаковых кустарниковых степей, долину р. Кубань и Урупско-Лабинский водораздел, где луговые степи сочетаются с дубовыми сообществами из дуба летнего на выщелоченных черноземах на плоских вершинах и с серыми в различной степени оподзоленными почвами на склонах, покрытых остатками лесной растительности. Причерноморско-Предкавказский географический вариант Степного биома (Приазовско-Предкавказская разнотравно-дерновиннозлаковая степь) включает Кубано-Приазовскую низменную равнину (150 м над ур. м.), дельту р. Кубань, Прикубанскую наклонную равнину, юго-западную часть Ставропольской возвышенности, где широко представлены формации *Botriochloeta ischaemi*, *Stipeta lessingiana*. Приазовско-Предкавказская разнотравно-дерновиннозлаковая степь и Кубанская дубовая лесостепь отличаются высоким фиторазнообразием на таксономическом и ценотическом уровнях. Растительность носит экотонный характер, находясь на стыке крупных физико-географических единиц (Восточно-Европейская равнина и Кавказская горная страна) и на границе понтического, средиземноморского, переднеазиатского и кавказского флористических центров.

Анализ географической структуры показал участие средиземноморских элементов в сложении ценофлоры. Древнесредиземноморский тип ареала имеют 13% видов, голарктический – 20, евразийский степной – 29,6%. Высок показатель эндемичности. В Кубанской лесостепи и Приазовско-Предкавказской разнотравно-дерновиннозлаковой степи зарегистрировано немало эндемичных видов: *Ferula euxina* Pimenov, *Crambe gibberosa* Rupr., *Podospermum lachnostegium* Woronow, *Podospermum schischkinii* (Lipsch. et Vass.) Kuth., *Onobrychis vassilczekoi* Grossh., *Allium psebaicum* Mikheev, *Elytrigia stipifolia* (Czern. ex Nevski) Nevski, *Iris notha* M. Bieb., *I. furcata* M.

Bieb. и др. Во флоре биома нередко такие виды, как причерноморско-прикаспийский степной эндемичный вид *Palimbia redivina* (Pall.) Thell., восточнопричерноморско-прикаспийский эндемик *Phalacrachena inuloides* (Fisch. ex Schmalh.) Pjin, произрастающий на солонцеватых и солончаковых остепнённых лугах в окр. с. Воронцовка Ейского района, *Centaurea trinervia* Steph. ex Willd. – в ковыльно-типчаково-эремурусовых ценозах в окр. с. Успенское, евразийский степной вид *Bellevalia speciosa* Woronow ex Grossh., *Silene borysthenica* (Gruner) Walters, произрастающий в песчаных степях кос Таманского п-ова (Чушка), *Fritillaria meleagroides* Patrin ex Schult. et Ledeb., приуроченный к пойменным лугам, тальвегам степных балок.

Кубанская дубовая лесостепь представлена кустарниковой дерновинно-разнотравной степью, относящейся к подзоне западно-предкавказских разнотравно-злаковых кустарниковых степей. На Фанталовском отроге Таманского п-ова (окр. хут. Ильич, склоны горы Дубовый Рынок) принимают участие кустарники: *Prunus spinosa*, *Rosa gallica* L., виды рода *Crataegus*. В пределах Кубано-Приазовской низменной равнины отмечена разнотравно-злаковая кустарниковая степь с *Caragana frutex* (L.) C. Koch, *Calophaca wolgarica* (L. fil.) DC., *Cerasus mahaleb* (L.) Mill., шиповниками, терном. Это особый провинциальный вариант западно-предкавказских степей. Кустарники присутствуют в степной растительности правобережья р. Кубань – *Amygdalus nana* L., *Rosa jundzillii* Bess., *Rosa canina* L., *Prunus spinosa*, *Crataegus monogyna* Jacq. Западные отроги Ставропольской возвышенности – это ковыльно-разнотравные кустарниковые степи с *Rhamnus pallasii* Fisch. et Mey., *Caragana mollis* (DC) Bess. [11].

Лесостепь хорошо выражена на Урупско-Лабинском водоразделе, где луговые степи сочетаются с дубовыми сообществами из дуба летнего на выщелоченных черноземах на плоских вершинах и с серыми в различной степени оподзоленными почвами на склонах, покрытых остатками лесной растительности. Дубовые леса с видами шиповника, боярышника сохранились изолированными фрагментами, например, Дубовый Рынок, в окрестностях хут. Приазовский и др. Остатки лесных массивов равнинной лесостепи сохранились по надпойменным террасам долины Кубани и на Прикубанской наклонной равнине. Небольшие рефугиумы лесной растительности имеются в правобережье р. Кубань, так называемые «дубинки». На правом берегу реки Кубань, сохранился участок дубового насаждения «Красный Лес» (5200 га) с участием клена, ясеня, яблони. Он генетически связан с горными лесами Кавказа, которые уже в историческую эпоху опустели сплошной лентой по долине р. Кубань, наступая на степь. В низовьях р. Лаба и по Кубани распространены пойменные луга, тугайные леса и заросли кустарников. В пойменных лесах (урочище «Красный Кут») произрастают: *Salix alba* L., *Populus alba* L., *P. nigra* L., *Ulmus minor* Mill., *Fraxinus excelsior* L., *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *A. incana* (L.) Moench. В дельте р. Кубань гряды и гривы заняты остепненными галофитными лугами (*Puccinellia distans* (L.) Griseb., *Aeluropus littoralis* (Gouan) Part., *Agrostis stolonifera* L., *Plantago cornutii* Gouan. Для левобережной части Кубани характерны дубовые и грабово-дубовые леса,

в сочетании с луговыми богаторазнотравными и разнотравно-типчакково-ковыльными степями. В лесостепи юго-западной части Ставропольской возвышенности отмечены широколиственные леса (дубово-ясенево-грабовые с примесью клена, ильма, груши, яблони, кизила), занимающие долины и балки.

В Причерноморско-Предкавказском варианте Степного биома значительные территории занимают плавнево-литоральные комплексы. Река Кубань образует обширную дельту, представленную системой плавнево-лиманских ландшафтов. Площадь дельты р. Кубань 4190 км², площадь устьевоего взморья – 110 км², количество лиманов – более 280. В дельте р. Кубань произрастают специфические интразональные лиманно-плавневые и плавнево-литоральные флороценотические комплексы. Плавни – это особый тип лугово-болотной растительности, формирующийся в условиях периодического или постоянного переувлажнения. Эдификаторную роль выполняют два вида: *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. и *Phragmites altissimus* (Benth.) Nabile, реже *Typha latifolia* L., *Typha angustifolia* L. с участием видов рода *Alisma*, *Oenanthe aquatica* (L.) Poir., *Glyceria fluitans* (L.) R. Br., *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla. В толще воды – виды *Potamogeton*, *Stuckenia pectinata* (L.) Börner, *Ceratophyllum demersum* L., *Myriophyllum spicatum* L. Лиманная часть отличается богатством погружённой в воду растительности, состоящей из *Myriophyllum spicatum*, *Najas major* All., *Zannichellia major* Boenn. ex Reichb., *Caulinia minor* (All.) Coss. et Germ., *Ruppia maritima* L., *Zostera marina* L., *Potamogeton lucens* L., *P. perfoliatum* L. [3]. Из эндемичных видов отмечены *Achillea micranthoides* Клок., *Goniolimon graminifolium* (Ait.) Boiss., *G. tataricum* L.) Boiss., *Elytrigia pseudocaesia*, найден палеоэндемичный вид роголистника – *Ceratophyllum tanaiticum* Sapjegin [12].

Оригинальным типом растительности предкавказского биома является Азовская литораль. При незначительной площади прибрежной зоны на ней выражена довольно сложная структура растительного покрова [13]. Прибрежная зона Азовского моря занята псаммофильной литоральной растительностью со специфическими редкими видами: *Tamarix gracilis* Willd., *Astrodaucus littoralis* (M. Bieb.) Drude, *Argusia sibirica* (L.) Dandy, *Verbascum pinnatifidum* Vahl, *Gypsophila perfoliata* L., *Centaurea arenaria* subsp. *odessana* (Prodan) Dostäl, *Leymus sabulosus* (M. Bieb.) Tzvelev. Основной фон растительности придают ценозы с преобладанием *Leymus sabulosus*, *Artemisia tschernieviana* Bess., *Glycirrhiza glabra* L., *Ephedra distachia* L. При контакте тростниковых сообществ с литоральной песчаной полосой к *Phragmites australis* присоединяются литоральные виды: *Crambe maritima* L., *Argusia sibirica*, *Crambe pontica* Steven, *Cynanchum acutum* L. Мощным эдификатором литоральной прибрежной полосы Азовского побережья является *Leymus sabulosus*, произрастающий с псаммофитами: *Centaurea odessana*, *Eryngium maritimum* L., *Euphorbia peplis* L., *Verbascum pinnatifidum*, *Argusia sibirica*, *Plantago scabra* Moench.

Фауна Предкавказского Степного биома включает 50–55 видов млекопитающих, 150–165 видов птиц, богата фауна пресмыкающихся – 9 и

земноводных – 12 видов. Данные по фауне дельты р. Кубань: Беспозвоночные животные представлены следующими группами: черви, моллюски (классы брюхоногие, двустворчатые), членистоногие (классы ракообразные, паукообразные, насекомые) – всего 2129 видов. Из типа Mollusca в плавнево-лимманной зоне зарегистрировано 92 вида, в дельтовых водоемах обитает 60-68 видов рыб. Современное биологическое разнообразие орнитофауны дельты Кубани по разным источникам насчитывает от 133 видов птиц до 212, в устье р. Кубань – более 120 видов, класс Земноводные: отряд Бесхвостые (Anura), семейство Discoglossidae: жаба зеленая (*Bufo viridis*), жерлянка краснобрюхая (*Bombina bombina*), квакша обыкновенная (*Hyla arborea*), квакша Шелковникова (*Hyla arborea schelkownikowi*), лягушка озерная (*Rana ridibunda*). Состав герпетофауны здесь достаточно беден: ящерица прыткая (*Lacerta agilis*), уж обыкновенный (*Natrix natrix*), уж водяной (*Natrix tessellata*), черепаха болотная (*Emys orbicularis*). Видовой состав млекопитающих района устья р. Кубань в целом включает 52 вида (без морских); из них околоводных - 15, наземных - 37.

Как видим, все географические варианты биомов Западного Кавказа и Западного Предкавказья представлены разнообразными природными флористическими и фаунистическими комплексами, которые играют важную роль в депонировании углерода: хвойные и лиственные леса, редколесья, степи, водно-болотные угодья, луга, литораль. Важность этих биогеоценозов заключается в том, что они позволяют осуществлять взаимодействие между тысячами различных видов организмов, способствуя поставкам многообразных товаров и услуг. Они важны как убежища для разнообразной биоты, для обитания животных, служащих источником пищи или эстетического наслаждения. Западный Кавказ, Западное Предкавказье уникальны как природная среда, концентрирующая культурное и природно-культурное наследие, объектом которого являются символические ландшафты, предоставляющие культурные услуги: использование природы в религиозных целях, для школьных экскурсий, научных исследований, развития экотуризма и т.д. Духовные и рекреационные блага, культурные услуги природы, приносящие пользу рекреационной, эстетической, познавательной и духовной деятельности человека, сложно измерить в денежном выражении, но они не менее важны, чем другие экоуслуги.

Природные региональные экосистемы оказывают регулирующие, снабженческие, поддерживающие услуги. Водно-болотные угодья дельты р. Кубань удерживают большое количество воды, защищают прибрежные береговые зоны от приливной эрозии, снижают скорость нагонных волн, уменьшают вероятность наводнений. Использование биоразнообразия и экосистемных услуг оказывает помощь населению в адаптации к неблагоприятным последствиям изменения климата. Все экосистемные услуги, которые люди получают бесплатно от природных ненарушенных экосистем, жизненно важны для сохранения глобальной окружающей среды, благополучия людей, для снабжения продовольствием и водой, защиты от

стихийных бедствий и деградации почв, разложения отходов, естественного опыления агроценозов, предоставления товаров и услуг.

С другой стороны, регион – это «горячая точка» биоразнообразия, экосистемы региона находятся под острым риском потери устойчивости с серьезными последствиями для выживания видов, генетического разнообразия, экосистемных услуг и благосостояния людей. Каждые 10 лет Красные списки пополняются новыми видами, находящимися в угрожаемом состоянии. Степной биом Западного Предкавказья уничтожен, сохранившиеся участки степей подверглись процессу облесения и сейчас относятся к лесному фонду, что парадоксально. Угроза уничтожения даже элементов степной растительности стала реальностью. Причем скорость уничтожения степного предкавказского биома беспрецедентна: всего 100 лет понадобилось, чтобы прекратилось функционирование экосистемы. Уничтожение степей привело к потере уникального элемента биоразнообразия, жизнеспособности популяций видов (в Красную книгу Краснодарского края внесено 96 степных видов, находящихся в угрожаемом положении), эрозийным процессам, потере гумуса, пыльным бурям, вспышкам численности саранчи, не говоря уже о том, что данная региональная экосистема вычеркнута из глобального участия в депонировании углерода и из расчета национального углеродного баланса.

Для смягчения последствий изменения климата необходимо прежде всего начать процесс восстановления утерянных и потерявших стабильность природных экосистем и на основе экосистемного подхода стремиться использовать восстановление всего утерянного и деградировавшего лесного покрова, степной экосистемы, которые являются природными резервуарами, в качестве основы для повышения качества жизни, для урегулирования экологической нестабильности региона. Лесные экосистемы, благодаря невероятной сложности строения и функционирования, предоставляют важные экосистемные услуги: связывание углерода и регулирование климата, очистка воды, предотвращение эрозии, обеспечение среды обитания для огромного количества специфических организмов, включая и человека и др. Следует отметить, что на программу «Леса Кубани» из краевого бюджета выделено 1 057 692,7 тыс. руб. При экологическом подходе к лесовосстановлению ситуация может измениться в лучшую сторону.

В прогрессирующем современном деградационном процессе важно понять, что с помощью сохранения биоразнообразия мы можем решить проблему стабилизации предоставления разнообразных экосистемных услуг. Стабильность всех экосистем и предоставляемых ими экосистемных услуг как в глобальном биосферном процессе, так и для общества, прежде всего связаны с биоразнообразием, а это имеет важное значение для устойчивого развития, рационального управления природными ресурсами и решения многих экологических проблем, которые волнуют человечество.

Состояние биоразнообразия, природных экосистем должны стать сигналом: экологические проблемы Краснодарского края, Республики Адыгея должны стать приоритетными в формировании стратегии экономического роста и политики устойчивого экологического развития.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-45-230019 (№ 19/67 «Фитоценотическая структура и флористическое разнообразие деградирующего флороценотического комплекса Азово-Черноморской прибрежной зоны») и РГО № 37/2020-Р «Охраняемые природные территории и сохранение биологического разнообразия Российского Кавказа».

Список литературы

1. Косенко И.С. Определитель высших растений Северо-Западного Кавказа и Предкавказья. – М.: Колос, 1970. – 613 с.
2. Карта «Биомы России. М.: Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Русское Географическое общество, Всемирный фонд дикой природы, 2018. Масштаб 1:7 500 000. – Изд. 2-ое.
3. Литвинская С.А. Таксономическая и биогеографическая характеристика Флоры Западного Предкавказья и Западного Кавказа. Т. 2(1). - М., 2019. - 560 с.
4. Литвинская С.А. Таксономия и ключи для определения споровых растений Западного Кавказа // Ботанический вестник Северного Кавказа. – Махачкала, 2020. – №1. – С. 23–46.
5. Колаковский А.А. Растительный мир Колхиды. – М., 1961. – 460 с.
6. Инвентаризация основных таксономических групп и сообществ, созологические исследования Сочинского национального парка – первые итоги первого в России национального парка: науч. тр. СНП. – Вып. 2. – М.: Престиж, 2006. – С. 22–287.
7. Бондаренко С.В. Флора субальпийского пояса бассейна реки Белой (Западный Кавказ) // Фундаментальные и прикладные проблемы ботаники в начале XXI века: Матер. Всеросс. конф., Петрозаводск, 22–27 сентября 2008 г. – Петрозаводск, 2008. – Ч. 4. – С. 12–15.
8. Бондаренко С.В. Флора бассейна р. Афипс Западного Кавказа: автореф. дис. канд. биол. наук. – СПб., 2002б. – 18 с.
9. Литвинская С.А. Флорофитоценотическое разнообразие Западного Кавказа // Юг России: экология, развитие. – 2020. – Т. 15. – С. 37–48. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-37-48.
10. Литвинская С.А. Биогеографическая специфика степей Западного Предкавказья и Северо-Западного Закавказья // Степи Северной Евразии: Мат. VII Междунар. симпозиума / под ред. А. А. Чибилева. – Оренбург: ИС УрО РАН, Печатный дом «Димур», 2015. – С. 481–484.
11. Литвинская С.А. Кустарниковая степь и проблема леса и степи на Кубани: современный аспект // Биологическое разнообразие Кавказа и Юга России: Мат. Юбилейной XX Междунар. научн. конф., посвященной акад. Российской эколог. Акад., профес. Г. М. Абдурахманова. (г. Махачкала, 6-8 ноября 2018 г.). – С. 196–198).
12. Дубына Д.В. Эндемизм флоры плавнево-литорального ландшафта Дона и Кубани // Флора Нижнего Дона и Северного Кавказа: структура, динамика, охрана, проблемы использования. – Ростов н/Д., 1991. – С. 41–42.
13. Литвинская С.А., Постарнак. Бета-разнообразие литоральных фитоценозов Вербяной косы // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – М., 2008. – № 11. – С. 36–42.

МИКРОКЛИМАТ ГОРОДА АРЗАМАСА НИЖЕГОРДСКОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

М.С. Любов

lubov.arz@mail.ru

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Арзамасский филиал, г. Арзамас

Аннотация. В статье рассматриваются микроклиматические условия города Арзамаса Нижегородской области в начале XXI века. Дается анализ городского микроклимата и выявляется его влияние на окружающую среду, с учетом современных тенденций изменения климата.

Ключевые слова. Арзамас, микроклимат города, экологическая ситуация, изменения климата.

Город Арзамас расположен почти в центре Нижегородского Правобережья и имеет практически все характерные черты климата, присущие Правобережью Нижегородской области [4, с.25-29]. Территория Правобережья Нижегородской области занимает южную половину области, она ограничена реками: Волгой – на севере, Окой – на западе, Сурой – на востоке. Нижегородское Правобережье расположено в средней полосе европейской части России, в пределах 56°30' с.ш. и 54°30' с.ш.

Общий тренд глобального изменения климата не замедлил сказаться на местном климате отдельных регионов и городов, в частности. Безусловно, основной климатообразующий фактор – солнечная радиация, по сравнению с XX веком, практически не изменился. Суммарная среднегодовая солнечная радиация на территории Арзамасского района достигает 90 ккал/см² и пока остается достаточно стабильной. Другое дело циркуляция воздушных масс. Характерный для умеренных широт западный перенос воздушных масс все чаще стал нарушаться, преимущественно в теплый период года, субмеридианальным вторжением. Как правило, такое наблюдается при малоподвижных антициклонах и слабоактивных циклонических вихрях в тропосфере. Заметно увеличилась повторяемость Средиземноморских и Черноморских циклонов, при этом роль ультраполярного вторжения, особенно в зимний сезон, резко сократилась. Уменьшилось зимой и число повторяемости сибирских и Скандинавских антициклонов. Как известно, на степень континентальности климата влияет удаленность от Атлантического океана. Влажный морской воздух, проходя над подстилающей поверхностью Европы трансформируется и на территории нашего региона его влияние ослабевает. Но теперь в условия, когда океан стал чуть теплее, трансформация воздушных масс происходит медленнее и до Нижегородской области воздух зимой с Атлантики доходит еще мало остывшим. Это приводит к существенной повторяемости количества оттепелей зимой. Степень континентальности климата для г. Арзамаса составляет менее 55%.

Арзамас, как и любой другой урбанизированный город, характеризуется своим микроклиматом и природно-климатические условия города отличаются

от фоновых, и тем сильнее, чем крупнее населенный пункт. Арзамас является третьим по величине городом в Нижегородской области (его население на начало XXI столетия составило не многим более 100 тыс. человек) и крупным промышленным центром в Правобережье (в основном предприятия машиностроительного комплекса). Интенсивный рост городской инфраструктуры и промышленного потенциала Арзамаса к началу XXI века – на фоне общей тенденции потепления климата – привели к некоторому изменению климатических показателей города в сторону повышения среднегодовой температуры воздуха примерно 2°C и увеличения количества осадков на 30-50мм за год. Это в свою очередь, не замедлило сказаться на экологических условиях города в целом.

С расширением городской застройки и ростом промышленности произошло изменение микроклиматических условий. Поступающие в атмосферу промышленные выбросы и образующаяся в тёплый сезон при сухой погоде пыль заметно ослабляют солнечную радиацию (солнечное излучение), особенно при малой высоте солнца (т.е. ранним утром и перед закатом). В городе из-за сложной ориентировки вертикальных стен домов усиливается роль поглощенной солнечной радиации. На радиационный режим города сильно влияют различные аэрозоли, способствующие образованию над городом дымки, которая уменьшает прозрачность атмосферы. Наиболее заметно климатическое своеобразие города проявляется при устойчивых антициклональных типах погоды, повторяемость которой в теплый период заметно возросла.

Крупные города, как известно, представляют собой «острова тепла». В определённой мере это относится и к Арзамасу. В зимний сезон город становится, в некоторой степени, источником тепла. Тепловые выбросы котельных и других отопительных систем, неплотно прикрытые форточки и двери помещений, работающий транспорт – всё это вместе взятое, повышает температуру в городе на 2-3°C. В отдельные дни зимой, при антициклональном состоянии атмосферы, разница температур воздуха в Арзамасе и его окрестностях, может достигать 5-10°C. В летний период в силу наличия огромной массы камня и бетона, а также дорог с твёрдым покрытием город также становится аккумулятором тепла. Стены зданий и заасфальтированные поверхности в солнечные дни накапливают некоторое количество тепла, а ночью отдают его в окружающую среду. Таким образом, солнечная радиация непосредственно поглощается зданиями и другими хозяйственными объектами. Естественные температурные процессы ещё более искажаются в условиях города из-за малого испарения. Быстрое удаление осадков делает невозможным создание запасов влаги в почве и, следовательно, испарение с неё. Температурные контрасты становятся особенно заметными в городе и за его пределами летом, в вечерние часы при ясном небе [2, с. 14].

Городские условия так же влияют на развитие всех фенологических процессов, ускоряя тем самым приход весны и задерживая наступление холодного сезона. Период активной вегетации растений в городе

увеличивается примерно на неделю, что позволяет практиковать выращивание некоторых более теплолюбивых растений в городской среде. В город на несколько дней раньше приходит весна, соответственно и фенологические явления наступают быстрее, чем в районе. Безморозный период в городе всегда продолжительнее, чем в его окрестностях. Так, средняя дата схода снежного покрова в Арзамасе, по нашим наблюдениям в XXI веке, приходится на 5 апреля, а в его окрестностях на неделю позже. Последние заморозки на почве в городе заканчиваются к середине мая, а за его пределами вероятность понижения температуры воздуха до 0°C и ниже сохраняется до начала июня. Например, в 2014 г. последний заморозок на почве в Арзамасе отмечался 8 мая, а в районе – 19 июня. В осенний же сезон понижение температуры воздуха до 0°C и ниже в окрестностях Арзамаса происходит значительно раньше, чем в самом городе. Так, например, в 2016 г. первый заморозок на почве в Арзамасском районе был зафиксирован 12 сентября, а в самом городе – лишь 17 октября.

Микроклимат может быть обусловлен не только процессами антропогенного происхождения, но и особенностями рельефа. Так, существующий перепад высот в 30-40 метров между нижней частью Арзамаса и верхней оказывает заметное влияние на температурный фон, особенно при ясной погоде в условиях ночных температурных инверсий. В связи с этим зимой, в условиях антициклона, в нижней части города может быть холоднее на 5-10°C и больше, по сравнению с верхней частью Арзамаса. Соответственно и вероятность заморозков весной и осенью в нижней части города значительно больше, чем в его верхней части.

Рельеф города влияет не только на микроклимат, но и на особенности застройки городской территории. В Арзамасе довольно четко в геоморфологическом отношении различаются верхняя и нижняя части города. Нижняя часть города расположена в междуречье Теши и Шамки, высота над уровнем Балтики здесь составляет 120 – 125 метров. Верхняя (нагорная) часть Арзамаса имеет абсолютную высоту 140 – 160 метров. «Нагорный» рельеф верхней части города в сочетании с коренными пермскими породами (преимущественно глинами) благоприятствует многоэтажному (5 – 9 этажей) строительству. Вместе с тем, наличие оврагов и балок, а также карстовые процессы протекающие в черте города создают дополнительные трудности в возведение зданий и прокладки дорог и коммуникаций. Негативным фактором для строительства в нижней части города выступают грунтовые воды, уровень которых, особенно весной, близко подходит к дневной поверхности. С другой стороны, аллювиальные почвы долин Теши и Шамки, в условиях хорошего увлажнения способствуют разбивки огородов в частном секторе нижней части Арзамаса.

Особенности городской застройки оказывают заметное влияние на направление ветров. Причем ветровые румбы в центре города и на его периферии могут не совпадать. Многоэтажная застройка нарушает циркуляцию воздуха, затрудняет воздухообмен, что существенно отражается на общей экологической обстановке города. Скорость ветра в городе всегда значительно

ниже, чем на лугу или в поле. Сила ветра, обычно уменьшающаяся внутри городских кварталов, имеет максимум на высоте чуть выше среднего уровня крыш (для Арзамаса это примерно 20-30 метров от поверхности земли). На территории города Арзамаса, на двух стационарных постах, специалистами Центра мониторинга окружающей среды ФГБУ «Верхне-Волжского УГМС», проводятся наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха. Посты относятся к категории «городские фоновые» и расположены они в жилом массиве города. По их данным, за период с 2011 по 2015 гг. отмечена тенденция к росту уровня загрязнения воздуха диоксидом азота, фенолом, сероводородом, формальдегидом [1, с. 5].

Состояние городского воздуха и в целом окружающей среды на прямую зависят от количества и мощностей промышленных предприятий, а также наличия автотранспорта. С выхлопными газами в атмосферу попадают диоксид и оксид углерода, оксиды азота и многие другие вредные соединения. В ближайшее время требуется решение вопроса по переводу всего муниципального транспорта с бензина на газ. Транспортom загрязняется не только атмосферный воздух, но и почва в черте города и вблизи дорожных магистралей. Попадая в неё, вредные соединения накапливаются и через посредство растений включаются в пищевые цепи. Особенно сильно насыщаются почвы свинцом, медью, цинком, нефтепродуктами вблизи автостоянок, автомобильных и железных дорог. Что не может не вызывать беспокойства у владельцев садоводческих хозяйств, расположенных в непосредственной близости от оживленных магистралей города.

В городских условиях немалый вред окружающей природе наносит массовое выжигание сухой травы и бытового мусора. Плотная застройка, особенно в частном секторе, с большим процентом деревянных строений нередко приводит к пожарам. Но не только пожары являются негативным фактором выжигания сухой травы и сжигания бытового мусора. Дым от процесса горения существенно загрязняет атмосферный воздух и тем самым ухудшает среду нашего обитания [3, с. 36].

В последнее время в городе проводится ряд мероприятий, направленных на охрану окружающей среды. В частности, осуществляется усовершенствование технологии производства, строительство объездных дорог, переход с твёрдого и жидкого видов топлива на газ и т.д. В городе Арзамасе за последний период проведена большая работа по переводу котельных на газовое топливо, что позволило снизить выбросы по саже, каменноугольной пыли, оксиду углерода, диоксиду азота. Важной составляющей данных мероприятий является разработка новых ПДВ (предельно-допустимые выбросы) города. Новые нормативы ПДВ позволят улучшить качество атмосферного воздуха в городе и снизить количество выбросов, ликвидировать зоны повышенной концентрации вредных веществ. С 2007 г. в Арзамасе функционирует Центр комплексного мониторинга окружающей среды, где проводятся регулярные наблюдения за состоянием атмосферного воздуха, водоёмов и уровнем радиации [5].

Микроклимат города отличается и несколько большим количеством осадков. В городе количество осадков в среднем на 10% выше, чем в незастроенной местности. Можно выделить три основные причины выпадения большего количества влаги в городе. Во-первых, как уже отмечалось, город – это очаг тепла и его наличие приводит к более интенсивному движению воздуха по вертикали, т.е. к усилению процесса конвекции, а следовательно, и к образованию облаков. Во-вторых, это наличие в загрязнённом воздухе твёрдых примесей и пыли, которые становятся своего рода ядрами конденсации водяных паров. В-третьих, причиной увеличения осадков может являться эффект препятствий, обусловленный как естественным перепадом высот, так и многоэтажной городской застройкой. Крупные города как бы «обостряют циклоны». Кроме того, в городе наблюдается больше дней с осадками, грозой и туманом. Для больших городов в безветренную погоду характерным явлением становятся туманы антропогенного происхождения, а также дымка и мгла.

В городе, благодаря искусственному освещению улиц, заметно увеличивается продолжительность светового дня, что наряду с другими неблагоприятными экологическими факторами губительно действует на многие живые организмы. Это в свою очередь ведёт к обеднению и изменению городской фауны. Воздушную среду на улицах города помогают «оздоравливать» зеленые насаждения, площадь которых насчитывает более 300 га. Соответственно в Арзамасе на каждого жителя приходится 30 кв. м, что значительно больше действующих нормативов по стране – 18 кв. м на человека. Растения служат своеобразным фильтром для загрязняющих веществ, особенно аэрозолей, они очищают воздух, улучшают микроклимат города, уменьшают сток осадков, снижают шумовое воздействие, украшают ландшафт, являются средой обитания для многих видов птиц.

Таким образом, наметившаяся тенденция потепления местного климата пока заметно, в целом, не изменила природно-экологическую ситуацию в регионе. Положение в средних умеренных широтах обеспечивает достаточное поступление солнечной радиации летом для успешного произрастания дикорастущих растений и большинства сельского-хозяйственных культур умеренного пояса. Отсутствие на территории региона существенных орографических барьеров на пути движения воздушных масс благоприятствует свободному воздухообмену – как в широтном, так и меридианальном направлениях, что в свою очередь создает условия частой смены антициклонального характера погоды на циклональный. Все эти факторы обуславливают на территории всего Нижегородского Правобережья неустойчивость климатических процессов, переменчивость погодных условий, что естественно не может не влиять в общей совокупности на экологию региона в настоящий период и в будущем [6]. При этом, проводимые нами в течение последних 30 лет наблюдения за погодой, на территории города Арзамаса и их анализ подтверждают тенденцию изменения климата в сторону потепления и увеличения количества осадков за год. Особенно существенно (в среднем на 2-3°C) потеплели месяцы холодного сезона, сократилась

продолжительность зимнего периода примерно на две декады, обновились некоторые показатели экстримальных значений температур воздуха. Ниже приводим среднестатистические климатические показатели для города Арзамаса за первые два десятилетия XXI века (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Средняя месячная температура (°C) и количество осадков (мм) по месяцам для г. Арзамаса

Год/ мес	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
2001	-4 45	-6 50	-2 22	9 35	12 50	18 65	23 5	17 45	13 30	3 87	-1 55	-12 55	6,1°C 510мм
2002	-7 57	-2 40	1 27	7 15	12 20	17 70	23 115	16 15	13 80	4 99	-2 55	-15 43	5,7° 640мм
2003	-8 30	-10 7	-6 20	5 33	15 30	13 95	22 70	19 120	12 50	6 53	1 30	-3 43	5,6° 580мм
2004	-7 37	-9 20	1 65	4 50	14 30	17 110	21 80	19 60	13 58	6 56	-2 30	-5 47	6,0° 645мм
2005	-5 35	-10 35	-8 35	5 36	16 45	17 85	19 50	18 40	13 35	6 35	1 33	-4 65	5,4° 545мм
2006	-14 25	-15 25	-5 35	6 25	13 50	20 60	18 75	18 60	13 80	6 45	-1 87	-2 35	4,5° 600мм
2007	-3 50	-13 45	2 15	5 27	16 33	17 37	20 100	22 30	12 90	7 42	-3 40	-7 25	5,9° 545мм
2008	-11 35	-5 38	1 35	9 40	12 40	16 60	20 45	19 100	10 45	9 45	1 50	-3 15	6,2° 550мм
2009	-8 30	-6 10	-3 25	4 20	13 30	18 70	20 65	17 70	14 14	6 37	0 35	-8 25	5,5° 435мм
2010	-17 50	-10 25	-4 10	7 10	17 40	20 8	25! 10	22 45	12 50	3 30	1 40	-9 110	5,6° 440мм
2011	-12 55	-14 25	-6 35	4 20	14 20	17 30	22 72	18 22	12 85	6 30	-3 45	-3 60	4,5° 550мм
2012	-9 30	-15 15	-5 25	8 50	15 45	17 37	21 40	18 110	12 55	7 75	1 30	-9 32	5,1° 550мм
2013	-9 42	-6 10	-8 45	5 50	15 38	19 48	19 100	18 52	11 140	6 55	3 25	-4 50	5,2° 650мм
2014	-12 23	-6 22	0 20	5 6	16 15	16 75	20 15	19 47	11 17	2 40	-3 20	-5 40	5,5° 342мм
2015	-8 20	-4 28	-2 1	5 40	15 10	18 120	18 50	15 50	14 40	3 37	0 40	-2 45	5,9° 480мм
2016	-11 80	-2 65	-1 50	8 120	13 30	17 15	20 55	20 55	10 60	4 20	-3 50	-8 25	5,6° 630мм
2017	-10 26	-6 25	1 15	6 43	11 45	14 46	18 168	18 43	12 62	5 40	0 58	-1 77	5,6° 650мм
2018	-7 26	-12 12	-9 23	6 48	15 13	16 30	20 132	18 31	13 47	6 43	-3 17	-7 25	4,7° 435мм
2019	-9 21	-4 30	-1 20	6 18	15 99	17 85	17 60	15 68	10 28	8 78	-1 5	-2 35	5,9° 545мм
2020	-2 34	-3 23	3 15	5 65	12 60	17 75	19 52	15 75	12 22	7 30	0 23	-9 13	6,3° 490мм
XXI в. Средн.	-8 35	-7 25	-2 27	6 36	14 44	17 68	19 59	17 66	11 48	6 49	-1 33	-6 33	5,5°C 520мм

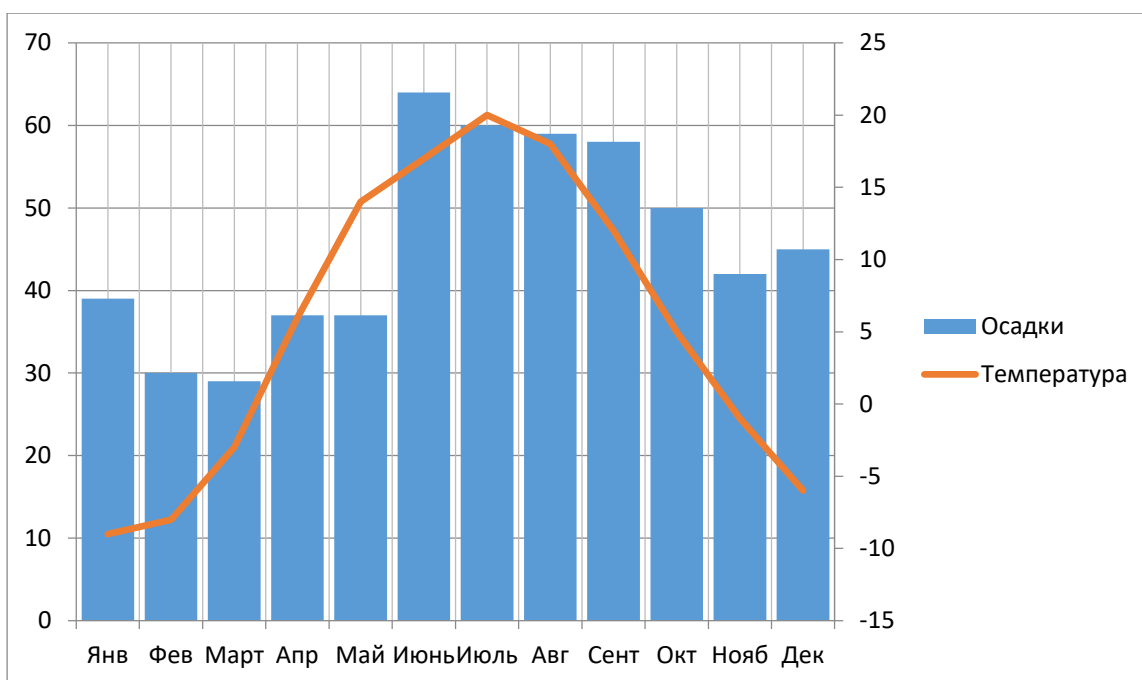


Рис. 1 Средние климатические показатели за XXI век

Список литературы

1. Арзамас. Экологическая обстановка – 2015: Доклад Сектора по экологии и охране природы департамента ЖКХ, городской инфраструктуры и благоустройства. – Арзамас, 2016.
2. Любов М.С. Микроклимат города Арзамаса и его влияние на окружающую среду / Теория и практика современного научного знания. Проблемы. Прогнозы. Решения. – СПб.: КультИнформПресс, 2017. – С. 13-15.
3. Любов М.С. Природно-климатические условия Арзамасского региона: монография / М.С. Любов. – Арзамас: Арзамасский филиал ННГУ, 2019. – 106 с.
4. Любов М.С., Любова Е.Ю. Нижегородскон краеведение: учебное пособие. – Арзамас: Арзамасский филиал ННГУ. 2016. – 109с.
5. Состояние окружающей среды и природных ресурсов Нижегородской области: Доклад Министерства экологии и природных ресурсов Нижегородской области. – Нижний Новгород, 2015.
6. Терентьев А.А., Колкутин В.И., Панютин А.А. Климат Нижнего Новгорода в XX веке и начале XXI века. - Нижний Новгород, 2011. – 280 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВОЗДУШНЫХ МИКРОПОТОКОВ ОТ ПЕСЧАНОЙ ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

¹Д.Р. Малиновский, ²Е.А. Малиновская

Malinovs.kyDenis@yandex.ru; elen_am@inbox.ru

¹*Ставропольский государственный аграрный университет,
Россия, г. Ставрополь*

²*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия, г. Москва*

Эмиссия пыльного аэрозоля в верхние слои атмосферы зависит от конвективных течений [1] существенным образом влияет на состояние экосистемы и климат [2]. Поток эмиссии микрочастиц размерами 0,1-5 мкм зависит от сальтаций частиц размером 70-300 мкм [3] - скачкообразного процесса ветрового выноса.

Поверхность, составленная из эоловых частиц под ветровым воздействием, является источником пыльного аэрозоля в атмосфере. Процесс ветрового выноса возможен при превышении критической или пороговой скорости ветра воздушного потока над подстилающей поверхностью. Частицы почвы (песка), отрывааемые ветром, летят над поверхностью, ударившись о поверхность, могут отскочить вновь, перекатиться или выбить другие частицы. При этом неясна роль приповерхностной конвекции на процессы эмиссии микрочастиц [4, 5].

Так как на вершине эоловой структуры отлагаются более крупные частицы, результатом их укладки является то, что между поверхностями частиц большие расстояния, что усиливается искривлением поверхности. Каналы в песчаной среде, образованные за счет укладки частиц также по этой причине более широкие. Так как для эоловых структур характерно закручивание потока с подветренной стороны, внутри каналов будет восходящее движение с двух сторон. При соединении потоков внутри на вершине будет происходить закручивание с вертикальным линейным движением. Усиливающийся к вершине эоловой структуры поток сальтирующих частиц замедляет движение воздуха у самой поверхности, что определяет возможность возникновения вертикальных конвективных движений, которые усиливаются микропотоками в каналах песчаной среды.

Натурные эксперименты, позволяющие исследовать роль микроканалов, образующихся благодаря неплотной укладке частиц, для масштабов порядка долей и десятков микрометров затруднительна. При этом возможно исследование средствами численного моделирования в серии экспериментов.

Поэтому исследовалось влияние изменений температуры поверхности и скорости горизонтального потока над поверхностью на движение в пористой среде (рис. 1). Смоделирована 3D форма области, повторяющей форму воздушного канала между частицами внутри пористой песчаной среды. Предполагалось, что частицы, составляющие пористую среду, имеют одинаковые размеры и сложены в прямоугольной укладке.

В качестве граничных условий при численном моделировании микропроцессов в воздушных каналах между частицами на поверхности

приняты следующие. Температуру поверхности меняли от 310° до 350° К с шагом в 10°. Скорость воздушного потока на верхней границе (над поверхностью) – от 0,01 до 0,05 м/с с шагом 0,01 м/с.

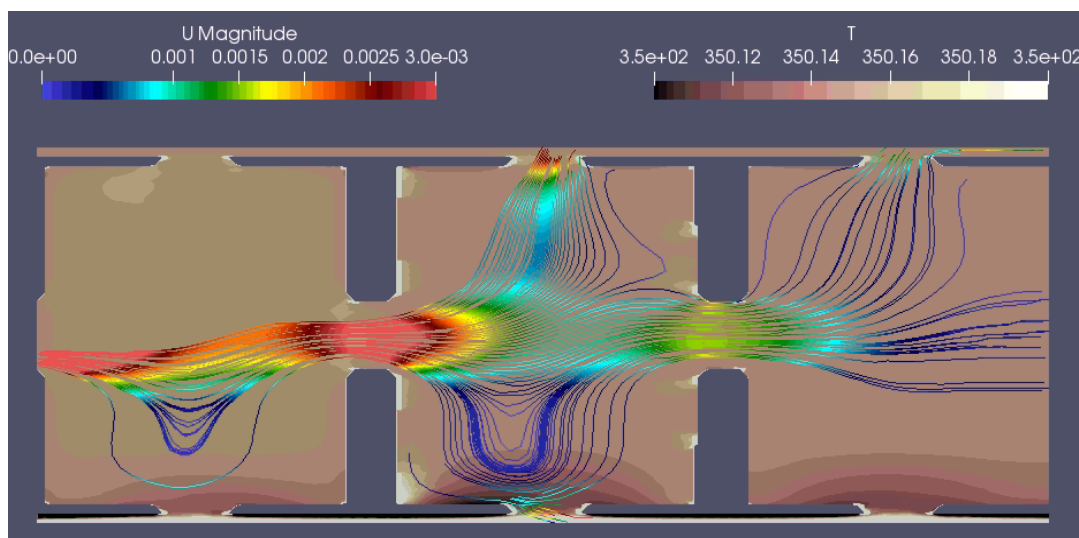


Рис. 1. Численный эксперимент: движение тепловых потоков в каналах среды

Вычислительный эксперимент реализован с использованием открытого пакета OPEN FOAM для ламинарной модели, учитывающей теплоперенос. Величина составляющей скорости U_z восходящего потока в верхней точке выхода к горизонтальному потоку над поверхностью возрастает с увеличением температуры от 0,002 м/с до 0,0026 м/с, что определяет механизм микроконвекции у поверхности. В нижней области под слоем частиц составляющая скорости U_z отрицательна и скачком возрастает по модулю при температуре выше 330 К, что способствует отрыву от поверхности крупных сальтирующих частиц и выносу из пор частиц микронного и субмикронного размера. Изменение скорости горизонтального потока над поверхностью в меньшей степени в отличие от температурных изменений влияет на динамику процессов в каналах и формированию восходящих микропотоков из пор песчаной среды.

Разогретая в летние месяцы песчаная пористая среда, создает особые условия для инициации восходящих тепловых микропотоков.

Исследование выполнено при поддержке проекта РФФИ 19-05-50110.

Список литературы

1. Zhang J. et al. Surface renewal as a significant mechanism for dust emission. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016. Т. 16, 24, С. 15517-15528.
2. Губанова Д. П. и др. Экспериментальные исследования аэрозолей в атмосфере семиаридных ландшафтов калмыкии. 2. Ландшафтно-геохимический состав аэрозольных частиц. *Геофизические процессы и биосфера*. 2018. Т. 17, 3. С. 18-44.
3. Shao Y. et al. Dependency of particle size distribution at dust emission on friction velocity and atmospheric boundary-layer stability. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. Т. 20, 21, С. 12939-12953.
4. Houser C. A., Nickling W. G. The emission and vertical flux of particulate matter < 10 μm from a disturbed clay-crust surface // *Sedimentology*. – 2001 – Т. 48 – №. 2 – С. 255-267.
5. Chkhetiani O. G. et al. Dust resuspension under weak wind conditions: direct observations and model // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2012 – Т. 12 – №. 11 – С. 5147.

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ АЭРОЗОЛЯ В ТРОПОСФЕРЕ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ ПРОЕКТА DELICAT

А.Е. Мамонтов, О.В. Федорова

alex1372049@gmail.com

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия, г. Москва

***Аннотация.** Основной задачей проекта DELICAT (DEmonstration of LIdar based CAT detection) была проверка новой возможности заблаговременного обнаружения областей турбулентности ясного неба с целью повышения безопасности полетов. Было предложено решать эту задачу путем регистрации интенсивности обратного рассеяния лазерного излучения при помощи установленного на борту самолета, специально разработанного лидара, работающего в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Летные испытания проводились в период с 17 июля по 12 августа 2013 г. над западной частью Европы и прилегающими морскими территориями. В большинстве случаев вдоль трасс полета присутствовали аэрозольные скопления различной мощности и/или области турбулентности. В этой работе мы приводим базу данных, иллюстрирующую полученные результаты, в виде набора двумерных пространственно-временных изображений, описывающих наблюдения в выделенных интервалах времени (зонах), где измерения наиболее надежны. Эта база будет служить основой для отбора пространственно-временных интервалов для более детального изучения полученных данных.*

***Ключевые слова.** Проект DELICAT, аэрозоль, турбулентность, лидар, авиация, зондирование атмосферы, спектр.*

1. Введение

Проект DELICAT (DEmonstration of LIdar based Clear Air Turbulence detection) был нацелен на решение одной из важных задач авиационной безопасности – заблаговременного обнаружения впереди по курсу самолета областей турбулентности ясного неба [1], [2]. Выполнение проекта началось в 2009 г., летные испытания проводились летом 2013 г. Это европейский международный проект, основными участниками которого являются: Thales Avionics (международная промышленная группа, выпускающая информационные системы для авиакосмического, военного и морского применения); CNRS (Centre national de la recherche scientifique), Франция; DLR (немецкий аэрокосмический центр), Германия; Novemere, Великобритания; Météo France, Франция; NLR (нидерландский аэрокосмический центр), Нидерланды; ONERA (Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales), Франция; INOE 2000 (National Institute for Research and Development in Optoelectronic), Румыния; Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия; Laser Diagnostic Instruments, Эстония; Варшавский университет, Польша; EADS (Innovation Works), Германия. Сотрудники Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН участвовали в проекте как на этапе

планирования, так и в процессе обработки и интерпретации данных (см. [3, с. 19-32], [4], [5]).

Заблаговременное обнаружение областей турбулентности ясного неба – важная практическая задача (далее турбулентность ясного неба будем кратко обозначать САТ – clear air turbulence). САТ возникает на высотах больше 5 км при ясной погоде или при наличии облаков верхнего яруса и не обнаруживается ни визуально, ни метеорадами. Запас времени после ее обнаружения должен быть достаточным для того, чтобы пассажиры успели пристегнуться, то есть не менее 2-3 минут. Важность этой проблемы подчеркивается тем фактом, что число происшествий, связанных с попаданием самолетов в области атмосферной турбулентности, увеличивается примерно в 3 раза быстрее числа полетов [8, С. 9]. В 40% случаев это турбулентность ясного неба. Число прецедентов попадания самолетов в САТ по разным источникам колеблется от 750 до 1500 в год. Большая их часть не причиняет вреда пассажирам и экипажу, однако авиакомпании страдают от задержек и перебоев рейсов. Травмируется в год порядка сотни человек, и это становится проблемой также для страховых компаний. К настоящему моменту задача заблаговременного обнаружения САТ еще не нашла удовлетворительного решения.

Авторы проекта DELICAT предложили следующий способ решения задачи: с помощью установленного на борту самолета ультрафиолетового лидара регистрировать интенсивность обратного рассеяния лазерного излучения на достаточно большом расстоянии впереди по курсу и определять наличие области турбулентности по возмущениям этой интенсивности. Подробное описание лидара можно найти, например, в работе [9]. Его основные характеристики: длина волны 355 нм, длительность импульса 7 нс, частота импульсов 100 Гц, угловая расходимость пучка 0.2 мрад, диаметр приемника 14 см. У лидара 2 приемных канала для ко- и кросс-поляризованного излучения. Минимальное расстояние зондирования 1.5 км, максимальное 15 км, что соответствовало 1 – 1.5 мин полета. Разрешение по расстоянию 5 м. Установлена система зеркал, которая направляет зондирующий луч вперед по курсу самолета. Имеется фильтр, отсекающий солнечное излучение с полосой пропускания 0.5 нм. В летных испытаниях был задействован самолет Cessna-citation-2, принадлежащий нидерландскому аэрокосмическому центру и дооборудованный для работы с установленным в салоне лидаром.

На рис. 1 показана карта полетов, которые проводились из амстердамского аэропорта Скипхол с 17 июля по 12 августа 2013 года. Полеты происходили над западной частью Европы с Британскими островами и прилегающими морскими территориями. Полеты нумеруются с 1 по 11, в 4-х случаях в один день выполнялись по 2 полета. Полет 1 был тренировочным, его данные неполны и не обрабатывались. В соответствии с задачей проекта полеты проводились в условиях ясной погоды.

Как правило, в отсутствие сбоев аппаратуры непрерывные измерения происходили в интервалах длительностью 695 секунд, далее следовал 5-

секундный промежуток без измерений. Для удобства мы присвоили полученным в таких интервалах группам данных короткие условные номера, которые и фигурируют на рис. 1 и 2.

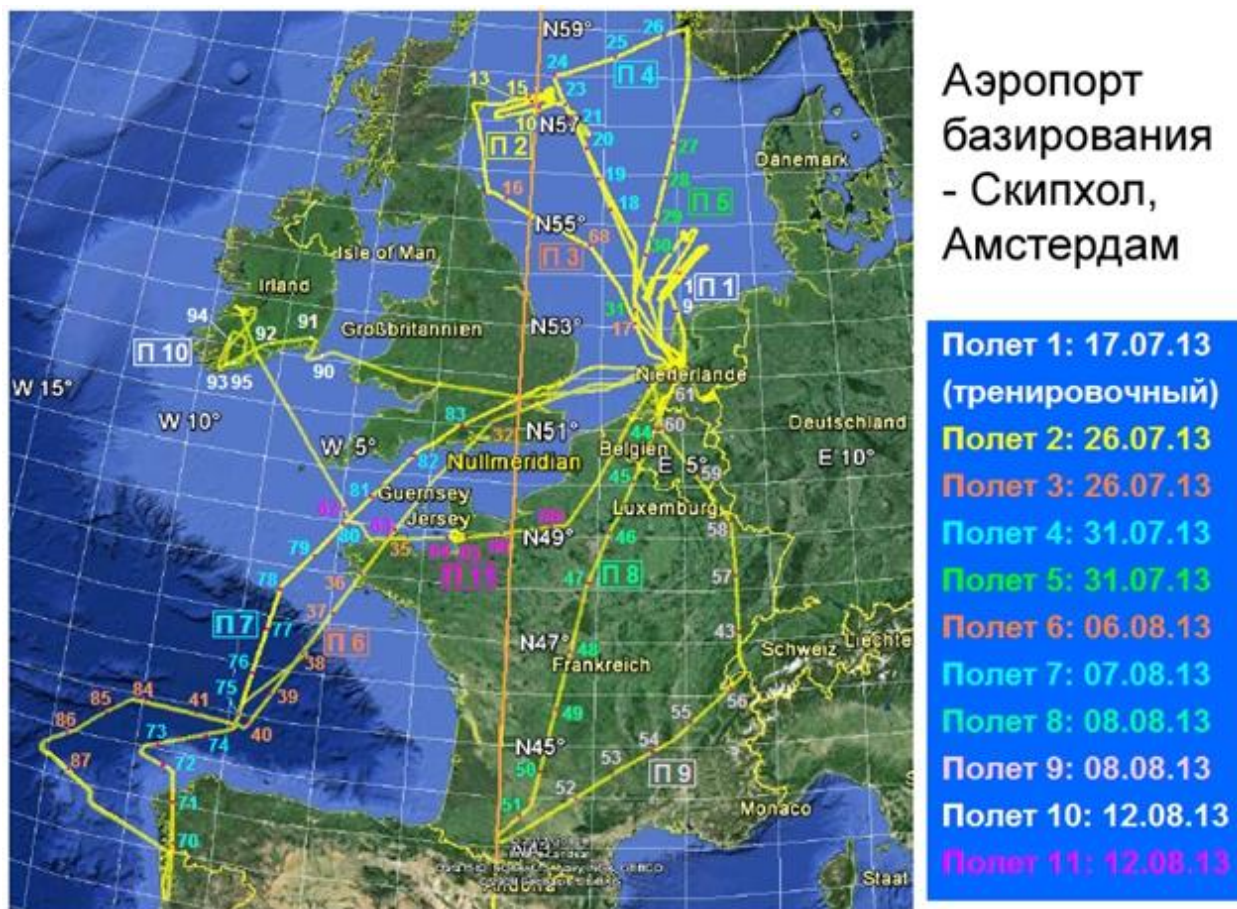


Рис. 1. Карта полетов проекта DELICAT. Полеты обозначены номерами разного цвета. Цифры рядом с траекториями – условные номера групп данных, поставленные в моменты начала измерений групп

Статистика количества полученных данных по времени измерений:

- общее летное время примерно 33 часа;
- общая продолжительность измерений для полетов с 2 по 11 – почти 16 часов;
- суммарная продолжительность измерений в так называемых зонах ~ 6 часов (зоны – выделенные участки траекторий, в которых незначительно менялись высота и направление полета, а также достаточно надежно работала система компенсации отклонений зондирующего луча от направления полета, то есть интервалы наиболее надежных измерений);
- общий объем полученных данных ~ 1.1 терабайт.

К данным измерений прилагаются сведения о таких параметрах полета, как высота, углы тангажа, рысканья и крена, вертикальное ускорение, GPS-координаты и воздушная скорость. На рис. 2 для всех полетов показаны их высоты, был охвачен высотный интервал от 7.5 до почти 12 км. Всего в

полетах выделено 30 зон (отмеченных на рис. голубым цветом), измерения производились в 27 из них.



Рис. 2. Сведения о высотах для всех полетов. На нижней части каждой панели голубым цветом показано положение зон, вверху стоят условные номера групп данных, розовыми прямоугольниками выделены те группы, для которых результаты измерений были нами обработаны

В каждом полете были зарегистрированы заметные возмущения интенсивности обратного рассеяния, которые являются следствием появления на трассе самолета скоплений аэрозоля (мы будем называть их также облаками) и/или САТ.

Основная задача этой работы – представить базу данных, демонстрирующую результаты измерений, для последующего детального анализа полученной информации о скоплениях аэрозоля или областях турбулентности. Мы рассматривали главным образом данные, полученные в выделенных зонах и их окрестностях, в наших дальнейших планах – изучение всей имеющейся информации.

2. Методы и принципы исследования

Для выделения деталей и рассмотрения пространственной и временной эволюции скоплений довольно эффективным является представление данных измерений в виде двумерной картины, где по оси абсцисс откладывается расстояние от самолета X в километрах, по оси ординат – время t в секундах. Движение самолета в пространстве одномерно, двумерное представление получено следующим образом: данные об интенсивности в момент первого лидарного импульса укладываются на горизонтальную прямую, соответствующую этому моменту времени, для следующего импульса – на следующую прямую и т.д. Интенсивность обратного рассеяния умножается на квадрат расстояния для компенсации расхождения луча. Кроме того, для снижения влияния шума мы усреднили интенсивность по 3-м точкам расстояния и 9-ти временным точкам, что соответствует пространственному разрешению 15 м и временному 0.09 сек. Пример такого представления данных показан на рис. 3.

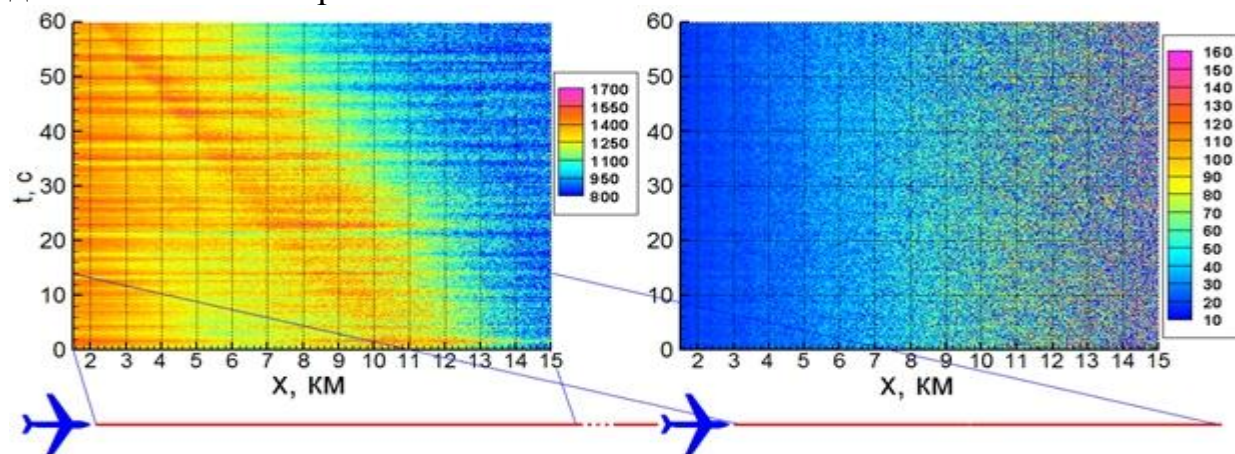


Рис. 3. Интенсивность обратного рассеяния, умноженная на квадрат расстояния и усредненная по 3-м точкам расстояния и 9-ти временным точкам. Слева – ко-поляризация, справа – кросс-поляризация. Полет 4, 31 июля 2013, часть зоны 5, UTC 11:47:05.66 – 11:48:05.66, высота 7600 м

На рис. 3 можно видеть, как выглядит в таком представлении облако аэрозоля или область турбулентности (они практически одинаковы). Область повышенной интенсивности смещается влево и вверх по мере приближения к облаку, угол наклона определяется воздушной скоростью самолета. Общее снижение интенсивности с увеличением расстояния от самолета объясняется главным образом молекулярным рассеянием [10]. Интенсивность в канале кросс-поляризации, как правило, существенно меньше, и во многих случаях, как и на данном рис., анализ показывает, что в этом канале регистрируются в основном шумы измерений. Далее мы будем рассматривать в основном интенсивность в канале ко-поляризации.

Если в некоторых случаях структура облаков отчетливо видна, то для выявления присутствия слабых скоплений необходимо использовать специальную методику обработки [10]. Эта методика позволяет, с одной стороны, учесть влияние молекулярного рассеяния (вдали от самолета) и аппаратных эффектов (вблизи) путем построения некоторой «кривой

чувствительности», и, с другой стороны, в значительной степени избавиться от шума измерений, пронормировав интенсивность на ее среднее значение в некотором выбранном интервале высот. Пример применения такой методики представлен на рис. 4.

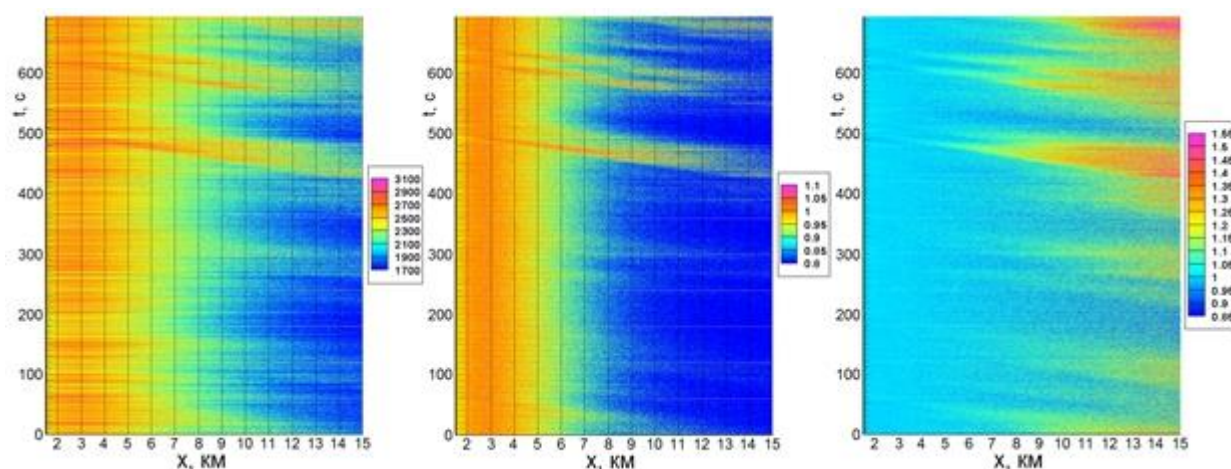


Рис. 4. Результат обработки данных, позволяющий увидеть тонкую структуру слабых скоплений аэрозоля. Слева – исходные данные, в центре – нормированные на среднее значение интенсивности в интервале [2], [3], [4], км, справа – дополнительно нормированные на «кривую чувствительности». Полет 9, 8 августа 2013, средняя часть зоны 21, UTC 20:08:18.95 – 20:19:53.95, высота 9400 м

3. Основные результаты

Основным результатом данной работы является совокупность рисунков, представляющих собой двумерные картины распределения интенсивности в зонах и их окрестностях в канале ко-поляризации (за одним исключением). Для краткости будем далее называть представленные данные просто распределением интенсивности. Как и на рис. 3 и 4, на последующих рисунках с 5-го по 17-й представлена интенсивность обратного рассеяния, умноженная на квадрат расстояния от самолета X и усредненная по 3-м точкам расстояния и 9-ти временным точкам, в зависимости от расстояния X и времени t .

Как показывает рис. 2, разным полетам соответствует разное число зон. Для полетов 2, 3, 5, 7, 8, 9, 11 все имеющиеся в них зоны объединены в общем рис. для каждого полета. Для полетов 4 и 6 данные показаны на 2-х рисунках для каждого из них. Для полета 10 один рисунок дает информацию о зонах, а другой соответствует промежутку между зонами.

На всех рисунках, за исключением рис. 6, справа от каждой панели голубой линией показана временная протяженность зоны. Если протяженность зоны невелика – меньше длительности записи группы 695 секунд – то, как правило, показана картина интенсивности для большего интервала для представления ситуации до начала зоны и после ее окончания. Время по оси ординат для каждой панели отсчитывается от ее начала (приближенное расположение зон по времени от начала полета, а также соответствующие им высоты см. на рис. 2, точные временные границы зон приведены в [6]). В случае больших по протяженности зон, не содержащих

заметных деталей, рисунки сжаты по вертикали по сравнению с большинством остальных.

Справа от каждой панели указаны цветовые обозначения уровней интенсивности. После каждого рисунка даются краткие комментарии о наличии облаков аэрозоля и/или зон турбулентности.

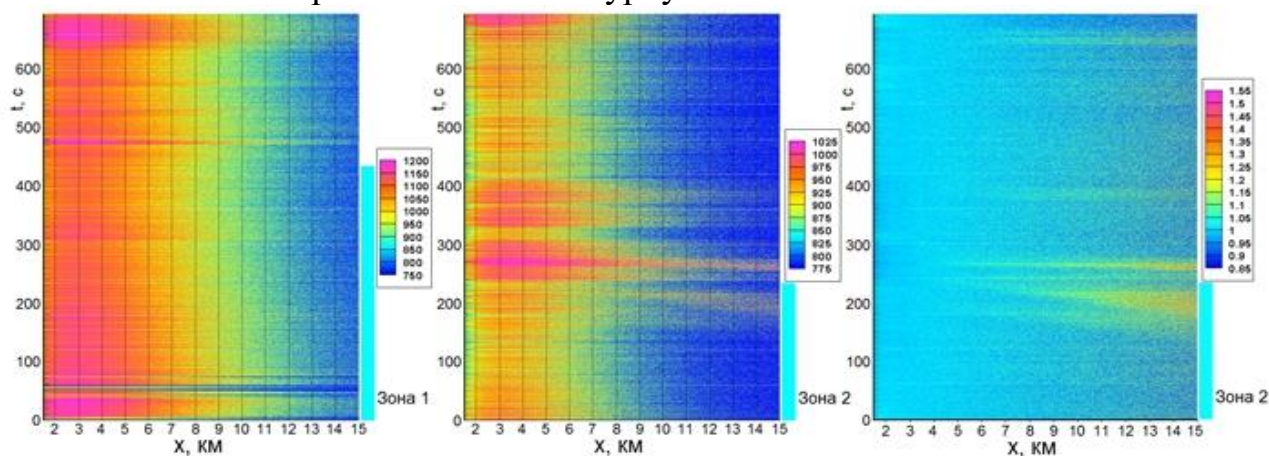


Рис. 5. Распределение интенсивности для зон 1 (слева) и 2 (в центре). Панель справа показывает результат выделения слабых деталей в зоне 2. Полет 2, 26 июля 2013 г.

В зоне 2 наблюдаются слабые облака, которые исчезают при приближении к самолету.

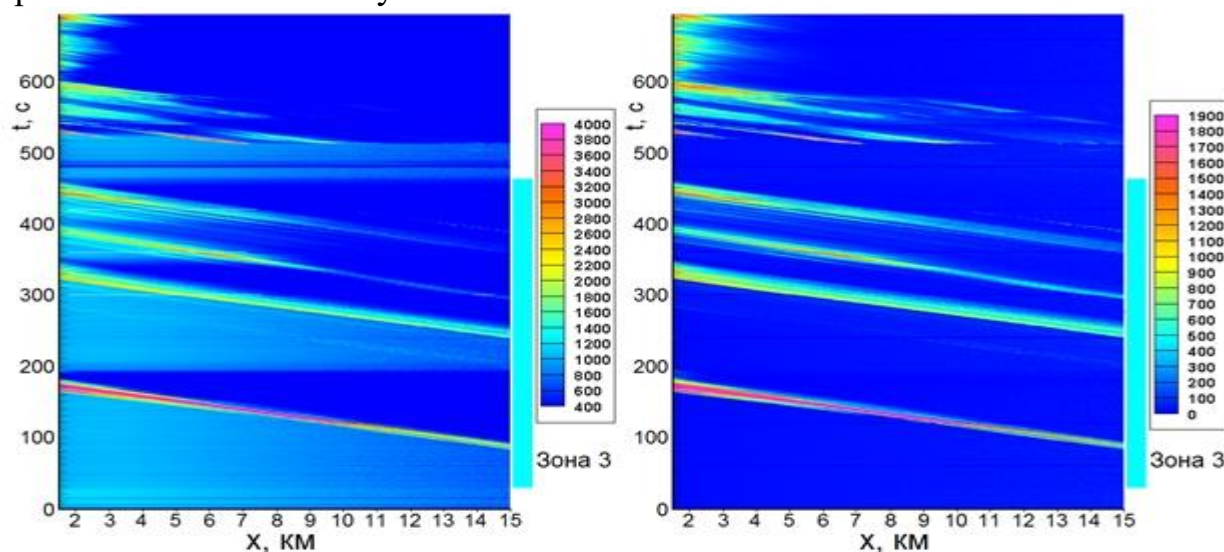


Рис. 6. Распределение интенсивности для зоны 3 (слева). Панель справа – интенсивность в канале кросс-поляризации. Полет 3, 26 июля 2013 г.

Один из случаев наблюдения сильных облаков, хорошо видимых и в канале кросс-поляризации, что, возможно, объясняется наличием в облаках большого количества несферических частиц [12]. Интересны случаи возникновения деталей при приближении к самолету.

Облачные детали, на левой панели представляющиеся довольно узкими, после обработки демонстрируют сложную структуру, которая, в отличие от предыдущего рисунка, при приближении к самолету теряет интенсивность.

Каких-либо деталей в пределах зон не заметно. Выше границы зоны 7 в ходе приближения к самолету возникает облако.

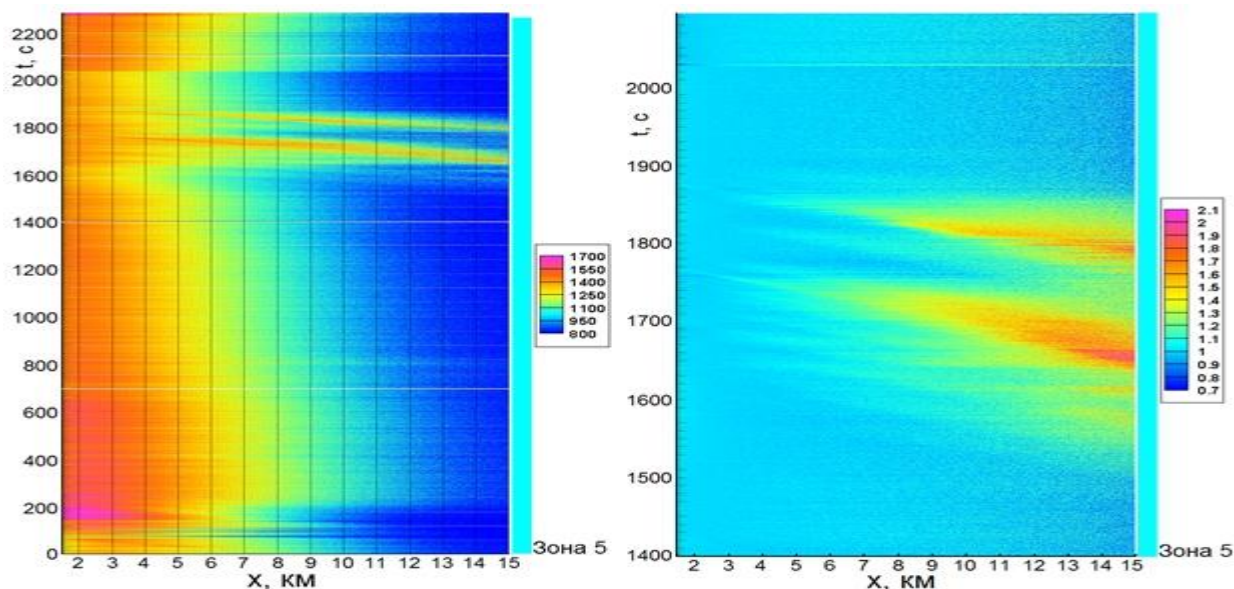


Рис. 7. Распределение интенсивности для зоны 5 (слева). Панель справа показывает результат выделения слабых деталей для части зоны 5 – интервала времени с 1400 до 2095 секунд. Полет 4, 31 июля 2013 г.

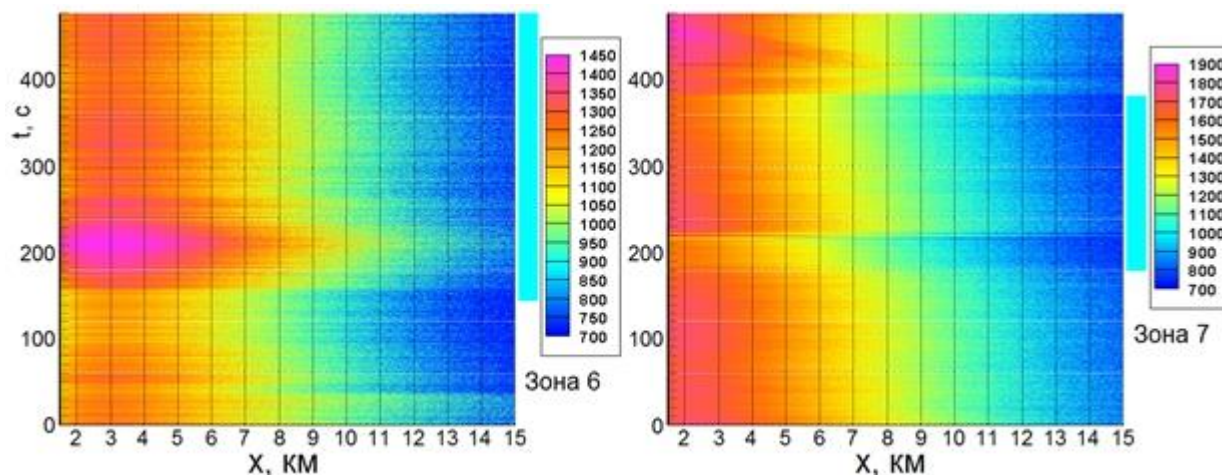


Рис. 8. Распределение интенсивности для зон 6 (слева) и 7 (справа). Полет 4, 31 июля 2013 г.

4. Заключение

В работе представлена база данных, состоящая из двумерных и трехмерных изображений спектров, демонстрирующих результаты измерений интенсивности обратного рассеяния излучения ультрафиолетового лидара с самолета в проекте DELICAT. Эта база может служить основой для отбора пространственно-временных интервалов для более детального изучения результатов наблюдения скоплений аэрозоля и/или зон турбулентности. Представленные изображения показывают большое разнообразие пространственных форм скоплений и характера их изменений во времени. Мы можем сделать следующие выводы: скопления аэрозоля и, возможно, области турбулентности присутствуют в 15 из 27 зон, из них в 5-ти случаях скопления слабые, в 7-ми довольно мощные, в остальных наблюдаются промежуточные варианты. Данные позволяют оценивать характерные размеры скоплений аэрозоля (несколько километров) и проследивать их временную эволюцию (времена жизни 20-30 секунд). Вне зон – в интервалах набора высоты и

снижения самолета – можно получить оценки вертикальных размеров скоплений, в некоторых случаях они достигают 800 м. Представленные результаты также могут являться основой для оценок возможностей аппаратуры, в частности – точности удержания зондирующего луча по курсу самолета. Мы предполагаем продолжить изучение этого материала

Список литературы

1. Feneyrou P. Performance evaluation for long range turbulence detection using ultraviolet lidar / Feneyrou, J. C. Lehureau, H. Barny // *Applied Optics*. – 2009. – V. 48. – No. 19. – P. 3750–3759.
2. Porteneuve J. Development of Rayleigh lidar for clear air turbulence detection / J. Porteneuve, T. Gaudo, A. Hauchecorne et al. // *25th International Laser Radar Conference 2010 (ILRC 25)*. – 2010. – P. 118–121.
3. DELICAT Report D5200. – 2014.
4. Gurvich A. S. Diagnostika korotkozhevushhih aerzolnyh skoplenij pri pomoshhi samoletnyh lidarov [Diagnostics of short-lived aerosol clusters using airborne lidars] / A.S. Gurvich, V. A. Kulikov // *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and oceanic optics]*. – 2016. – V. 29. – № 4. – P. 263–267. – doi: 10.15372/AOO2016020402. [in Russian]
5. Gurvich A. S. Impact of pitch angle fluctuations on airborne lidar forward sensing along the flight direction / S. Gurvich, V. A. Kulikov // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2017. – V. 10. – No. 10. – P. 3851–3864.
6. DELICAT Report D5300. – 2014.
7. DELICAT Report RoyMetSoc_20140115_DLR-ICM. – 2015.
8. DELICAT Report D6300. – 2016.
9. Vrancken P. Airborne forward-pointing UV Rayleigh lidar for remote clear air turbulence detection: system design and performance / Vrancken, M. Wirth, G. Ehret et al. // *Applied Optics*. – 2016. – V. 55. – No. 32. – P. 9314–9328.
10. Fedorova O. V. Lidarnye nablyudeniya stroeniya i evolyucii skoplenij aerzolya v proekte DELICAT [Lidar observations of the structure and evolution of aerosol clusters in the DELICAT project] / O. V. Fedorova, O. A. Koval, A. E. Mamontov // *Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata: sbornik trudov / pod red. G. S. Golicyna, I. I. Mohova, S. N. Kulichkova, M. V. Kurganskogo, I. A. Repinoj, O. G. Chhetiani [collection of works / eds. G. S. Golitsyn, I. I. Mokhov, S. N. Kulichkov, M. V. Kurganskij, I. A. Repina, O. G. Chkhetiani]*. – M.: Fizmatkniga, 2018. – 587 p. – ISBN 978-5-89155-312-5. – P. 574–582. [in Russian]
11. Fedorova O. V. Lidar observations of the structure and evolution of aerosol clusters in the DELICAT project / O. V. Fedorova, O. A. Koval, A. E. Mamontov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – V. 231. – 012016. – doi:10.1088/1755-1315/231/1/012016.
12. Burton, S. P. Observations of the spectral dependence of linear particle depolarization ratio of aerosols using NASA Langley airborne High Spectral Resolution Lidar / S. P. Burton, J. W. Hair, M. Kahnert et al. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – V. 15. – No. 23. – P. 13453–13473. <https://doi.org/10.5194/acp-15-13453-2015>.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ПЛОЩАДЕЙ

Т.Л. Михеева, Е.П. Лапина

mtat@ukr.net, lapina_lena@ukr.net

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,

Украина, г. Киев

Обоснование целесообразности создания технологии. Целью научных исследований является разработка и развитие методов компьютерной интерпретации данных геофизических полей при исследовании и разведке нефтегазовых месторождений Украины. Разработаны теоретические, информационные, технологические и методические основы повышения эффективности геологоразведочных работ за счет углубленного извлечения информации из комплекса геолого-геофизических данных на основе их интегральной интерпретации в рамках математических моделей, максимально адаптированных к особенностям строения геологического разреза, развитие программно-аналитических средств исследований нефтегазовых месторождений. Созданы компьютерные программы и технологии интерпретации данных магнитометрии и гравиметрии, программно-аналитический комплекс интерпретации магнитотеллурических данных на основе точных граничных условий импедансного типа, рассчитаны типичные геофизические модели и проанализированы по поиску углеводородов в пределах исследуемых регионов. Актуальность и важность ожидаемых результатов обусловлена прогнозированием новых перспективных участков, а также переоценкой запасов известных месторождений.

Состояние разработки проблемы. Связь нефтегазовых месторождений с глубинными разломами в пределах нефтегазоносных областей и провинций было обнаружено давно. Приоритет здесь принадлежит представителям российской и советской неорганической школы геологов-геохимиков-нефтяников (Д.И. Менделеев, М.А. Кудрявцев, П.М. Кропоткин, Порфирьев В. Соколов Б.А.). Связь нефтегазоносности земной коры с глубинными разломами Днепровско-Донецкой впадины изложены в работах Чебаненко И.И., Краюшкина В.А., Гавриша В.К., Клочко В.П., Лукина О.Ю., Радзивилла А.Я. и др. Институт геофизики НАН Украины является ведущей организацией в СНГ по картированию глубинных разломов, разработке моделей структурно-генетической связи нефтегазоносности коры с ее глубинной геофизической неоднородностью, механизма такой связи и т.д. (Чекунов А.В., Старостенко В.И., Гинтов О.Б., Кутас Р.И., Орлюк М.И., Пашкевич И.К. и др.).

Одной из важнейших экономических задач Украины является проблема ее обеспечения топливно-энергетическими ресурсами. Разведанные в настоящее время запасы углеводородов недостаточны, поэтому развитие нефтегазовых структур и доразведка уже известных месторождений является главной стратегической задачей нефтегазовой промышленности Украины. Основными методами изучения геологических структур, перспективных на

нефтегазоносность являются геофизические исследования, цель которых - построение геолого-геофизических моделей стратиграфических комплексов НГР Украины с выделением объектов первоочередных геологоразведочных работ.

Прогнозирование и поиски глубокозалегающих нефтегазоносных структур при несогласованном строении различных этажей осадочной толщи осуществляются геофизическими методами. Ведущим методом при решении этой задачи является сейсморазведка. Долгое время несейсмические методы (гравиразведка, магниторазведка, электроразведка) были мало задействованы при решении задач нефтегазовой геологии. Современные измерительные комплексы, системы спутниковой навигации, с одной стороны, и программные комплексы для обработки и интерпретации результатов полевых измерений, с другой стороны, снимают эти ограничения и позволяют использовать эти методы при создании и анализе сложных трехмерных геологических моделей в комплексе с сейсморазведкой. В последние годы несейсмические методы все больше задействованы для оценки перспектив нефтегазоносности. Установлено, что относительно небольшие дополнительные расходы при проведении исследований комплексом геофизических методов позволяют существенно уменьшить геологические риски нефтегазовых проектов и повысить результативность геологоразведочных работ. Мировой опыт показывает, что большинство антиклинальных структур, рифов и других ловушек вполне уверенно отмечаются современной гравиразведкой с помощью съемок масштабов 1:25 000 и 1:50 000, по гравитационному и магнитному полю можно получить информацию относительно поверхности кристаллического фундамента и мощности осадочной толщи и тем самым прогнозировать общие перспективы нефтегазоносности изучаемых территорий. Изучение блокового строения фундамента позволяет выявить нефтегазоперспективные ловушки в нижних горизонтах осадочной толщи, а также структуры и залежи, расположенные в выше залегающих отложениях. Трассировки унаследованных дизъюнктивных нарушений в осадочной толще позволяет оценить пути миграции углеводородов и выполнять оценку перспектив нефтегазоносности площадей над отдельными блоками.

В сложных сейсмогеологических условиях использования динамических параметров для определения характеристик коллекторских свойств и флюидонасыщенности достаточно проблематично. Альтернативой сейсмическим методам является геоэлектрические, выполненные по данным метода магнитотеллурических зондирований (МТЗ). Результаты МТЗ, выполненные на нефтеперспективных площадях, могут служить существенным дополнением к данным, получаемым сейсморазведкой.

В нефтегазоносных бассейнах, которые прошли рифтовую стадию развития (Днепровско-Донецкий, Карпатский) - формирование ловушек здесь определяется совокупностью продольных и поперечных разломов, образующих сложную систему горстовых и моноклинальных блоков, грабенных и других форм. С моноклинальными блоками могут быть связаны

тектонические и стратиграфично экранированные залежи. Над моноклинальными блоками или их склонами возможны залежи литологического типа, связанные с линзами песчаников, а также рифогенными и карбонатными образованиями. Еще выше по разрезу над блоками фундамента располагаются ловушки и соответственно залежи антиклинального типа. Весьма перспективным является поиск глубинных ловушек углеводородов, связанных с надсубными дислокациями. Над породами фундамента, дорифтового и в нижней части рифтового комплексов, возможно наличие соленосных отложений. С соляными структурами могут быть связаны залежи нефти и газа как антиклинального, так и неантиклинального типов. Выше соленосных залежей, в верхней части рифтового и послерифтового комплексов, которые не связаны с влиянием разломно-блоковой тектоники, распространены ловушки и залежи антиклинального типа. Стоит вопрос о поисках залежей неантиклинального типа, надсолевых, а также глубокозалегающих (более 2-3 км) залежей, которые непосредственно связаны с особенностями строения фундамента.

Следует отметить, что месторождения в Львовско-Волинском бассейне и Донецко-Днепровской впадине находятся в стадии падения добычи. Уровень истощения составляет до 85%, но потенциал углеводородов в Украине достаточно высок. Сейчас стоит вопрос существенного наращивания ресурсной базы нефти и газа. Важную роль в решении этой задачи играют несейсмические методы изучения недр и развитие фундаментальных научных исследований в области интерпретации полученных результатов.

В основу предлагаемой научной работы положены идеи и результаты предыдущих исследований авторов: математические методы и информационно-компьютерные технологии определения параметров интегральных геолого-геофизических моделей сложнопостроенной геологической среды. Идеи и принципы нелинейной динамики теоретико-группового анализа нелинейных параболических уравнений в частных производных типа «реакция-диффузия», точных граничных условий импедансного типа. Развитие теории решений нелинейных обратных задач гравиметрии, создание компьютерных технологий интерпретации гравиметрических, магнитометрических и геоэлектрических данных с целью уточнения геологического строения геосреды и прогнозирования полезных ископаемых. Выделение нефтегазово-контролирующих и нефтегазово-подводных разломов по результатам 3D геофизического моделирования и предложенного комплекса методов является новым этапом геофизических исследований [6, 7, 8].

Методы исследований, используемые в технологии. Пользуясь достижениями последних лет, полученными в отделе математической геофизики Института геофизики НАН Украины, большой опыт в разработке программно-алгоритмического обеспечения, позволяют сформировать направления исследований, ориентированные на решение актуальных задач нефтегазовой геологии.

1) Методы и модели диагностики геосреды. Сформулированы и доказаны общие положения о редукции дифференциальных уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (в конечномерных динамических системах). Этот метод дает возможность построить решения, содержащие произвольные функции, которые могут быть использованы для решения краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных, свойства которых изучаются. Второе направление исследований, это связь между интегрируемостью в квадратурах обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, включающие потенциал, является решением стационарных уравнений типа Кортвега де Фриза интегрируемых методом решения обратной задачи рассеивания. Разработанные методы применены к системе нелинейных параболических уравнений генерации электромагнитных возмущений типа "реакция-диффузия", системы уравнений Максвелла, а также уравнений, описывающих линейные и нелинейные процессы диффузии в неоднородной среде [8].

2) Комплексирование методов интерпретации гравитационных и магнитных аномалий, основанные на аналитической аппроксимации дискретно заданных значений поля аномальными эффектами систем эквивалентных источников. Построение высокоточных карт геопотенциальных полей, отражающих распределение геоплотностных (геомагнитных) неоднородностей в плане и на глубине, обеспечение решения задач структурно-тектонического и нефтегазогеологического районирования территорий [2, 3].

3). Моделирование геологических тел и структур на основе решений обратных задач гравиразведки и магниторазведки методом автоматизированного подбора источников поля. Кроме традиционного функционально-аналитического подхода используется вероятностно-статистический: определение апостериорных функций плотности вероятности целевой функции. Комплексирования статистических и детерминированных методов при инверсии геофизических данных позволит существенно повысить достоверность получаемых геологических результатов. Базовым модельным классом в данном случае являются контактные поверхности - субгоризонтального раздела горных пород, которые обладают различными петрофизическими характеристиками. Данный модельный класс успешно используется при аппроксимации геологических границ в пределах осадочных бассейнов нефтегазоносных областей [1].

4) Развитие технологий количественной интерпретации трехкомпонентных измерений магнитного поля по данным ΔX , ΔY , ΔZ одновременно. Важно отметить, что интерес к этой проблеме повысился в последнее время в связи с появлением и практическим применением магнитометров, позволяющих осуществлять измерения трех компонент магнитного поля. Работоспособность программ подбора по компонентам магнитного поля ΔX , ΔY , ΔZ апробирована при решении модельных и практических задач. Установлено, что в ряде случаев в верхней части разреза

над залежами углеводородов происходит перераспределение окислительных и закисных форм железа, что может привести к резким перепадам (уменьшение и увеличение) магнитной восприимчивости пород. Количественная интерпретация данных трехкомпонентной магнитной съемки в данных физико-геологических условиях может оказать существенную помощь при выявлении и локализации залежей углеводородов [3, 4].

5). Программный комплекс интерпретации магнитотеллурических данных на основе использования граничных условий импедансного типа. Методика предназначена для визуализации данных МТЗ на этапе качественной интерпретации параллельно с методом тензора импеданса и векторов Визе. Безусловным преимуществом данного подхода является независимость от условия плоской падающей волны и использования всех шести компонент электромагнитного поля (в т.ч. Z компоненты электрической составляющей МТ-поля). Как правило, удельное электрическое сопротивление нефтегазоносных пластов превосходит сопротивление водоносных в 10 раз и более, причем сопротивление газовых залежей выше чем нефтяных. Это приводит к положительным аномалиям кажущегося сопротивления, которые на десятки процентов превышают уровень сопротивления законтуренной области [5].

б) Создание методов комплексной интерпретации данных гравиразведки и геотермии на основе различных методов минимизации многопараметрических функционалов. Предпосылкой является тесная взаимосвязь и совместное участие эндогенных и экзогенных термических процессов в формировании скоплений нефти и газа, что позволит идентифицировать аномалии теплового потока, связанные со структурно-теплофизическими неоднородностями и конвективным выносом тепла флюидами и оценить нефтегазоносность недр [6].

Интегрирование теоретических и программно-алгоритмических разработок позволяет сформировать технологию комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, предназначенных для решения задач нефтегазовой геологии. Актуальность и важность полученных результатов обуславливает прогноз новых перспективных участков, а также переоценку запасов известных месторождений.

Список литературы

1. Лапина Е.П., Михеева Т.Л., Панченко Н.В. Локализация геологических объектов по магнитометрическим данным с использованием алгоритмов автоматизированного подбора. Геофизический журнал. 2016. 38, № 6. С. 160 – 173.
2. Кишман-Лаванова Т.Н. Парето-оптимальные решения обратной задачи гравиметрии в классе трехмерных контактных поверхностей. Геофиз. журн. 2020. 42. № 6.
3. Михеева Т.Л., Лапина Е.П., Панченко Н.В. Прямая и обратная задачи магнитометрии для совокупности горизонтально расположенных стержневых тел. Геоинформатика, № 1 (73) – 2020. С. 64 – 71.
4. Михеева Т.Л., Лапина Е.П., Панченко Н.В. Автоматизированный подбор по векторным измерениям аномального магнитного поля. 15 th EAGE International Conference.
5. Причепий Т. И. Модификации мнимых векторов, их свойства и возможности при визуализации магнитотеллурического поля. Геоинформатика, № 1 (73). 2020. С. 72 – 81.

6. Шуман В.Н. О прогнозируемости активных геосистем: метастабильности и устойчивые переходы вместо аттракторов // Геофизический журнал - 2016. - Т. 38, №6. - С. 3 – 24.

7. Tsyfra I and Czyzycki T. Symmetry and solution of neutron transport equations in nonhomogeneous media. // Abstract and Applied Analysis - 2014. - Vol.2014 - P. 1.

8. Tsyfra I.M., Rzeszut W. and Vladimirov V.A. Lie-Backlund symmetry and non-invariant solutions of nonlinear evolution equations, arXiv: 1701.03722 [math. AP], 2017, 8 p. (Препринт, Cornell University, USA)

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РЕЧНЫХ И ЛАГУННЫХ ВОД В КАСПИЙСКОМ, ЧЕРНОМ И БАЛТИЙСКОМ МОРЯХ

¹К.Р. Назирова, ¹О.Ю. Лаврова, ²Д.М. Соловьев

knazirova@cosmos.ru

¹Институт космических исследований РАН, Россия, г. Москва

²Морской гидрофизический институт РАН, Россия, г. Севастополь

Аннотация. Представлены результаты многолетнего мониторинга распространения речных и лагунных вод под действием морских динамических и метеорологических процессов в акваториях Каспийского, Черного и Балтийского морях. На основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения и результатах натурных измерений, для каждого исследуемого полигона описаны основные особенности интрузии распресненных речных и лагунных вод, их влияния на прибрежную гидрологическую структуру и характер распространения в зависимости от динамических условий. Исследования базировались на использовании спутниковых данных в видимом диапазоне, полученных с космических аппаратов: Landsat-5 (TM), Landsat-7 (ETM+), Sentinel-2A/2B (MSI), Landsat – 8 (OLI). Обработка спутниковых изображений проводилась в информационной системе "SeeTheSea", разработанной в Институте космических исследований РАН. В Черном и Балтийском морях проводились синхронные со спутниковой съемкой натурные измерения в приустьевых зонах для верификации результатов, полученных на основе спутниковых данных.

Ключевые слова. Речной плюм, концентрация взвешенного вещества, мутность, транспорт взвешенных частиц, дистанционное зондирование, *in-situ*.

Введение

Речной сток - главный источник поступления в море растворенных и взвешенных веществ, в том числе продуктов антропогенного загрязнения. Эти вещества существенно и во многих случаях негативно влияют на экосистемы прибрежных районов [1]. Поэтому мониторинг приустьевых областей и понимание динамики распространения речных вод на морских шельфах - важная практическая задача. Попадая из реки в море, материковые воды образуют там прилежащие к устью мезомасштабные структуры, выделяющиеся пониженной соленостью и температурой, отличной от окружающей, а также, как правило, повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворенной органики. Такие структуры в современной литературе принято называть "плюмами" (от английского "plume") [1].

Речной плюм на спутниковых изображениях true color (true color images - TCI) хорошо виден за счет контрастных различий мутных речных вод и условно "чистых" морских вод, окружающих его. Параметр, характеризующий уменьшение прозрачности воды в связи с наличием

органического и неорганического взвешенного вещества, называется мутность морской воды. Существует несколько методик определения мутности морской воды, имеющие различные физические основы, различные единицы измерения, но характеризующие один и тот же показатель [2].

Определение количественных характеристик мутности и концентрации взвешенного вещества на основе спутниковых данных является сложной задачей. Существует ряд стандартных и региональных алгоритмов, которые требуют верификации для каждого конкретного района. В данной работе представлены результаты, полученные для плумов рек Сулак (Каспийское море), Мзымта (Черное море) и выноса вод из Вислинского залива в Балтийское море.

Используемые данные

Изучение характеристик плумов речных вод в Каспийском, Черном и Балтийском морях базировалось на двух типов данных: данных спутникового базирования и данных натурных измерений. В качестве спутниковых данных использовались данные сенсоров MSI Sentinel-2A/B, OLI Landsat-8, OLCI Sentinel-3, а также архивные данные TM/ ETM+ спутников Landsat-5/ Landsat-7. Спутниковые данные использовались для построения цветосинтезированных изображений в естественных цветах (True Color image), карт TSM (Total Suspended Matter) или распределения мутности на основе различных алгоритмов.

Натурные измерения, синхронные со спутниковой съемкой, проводились в приустьевых зонах с борта маломерных судов с использованием следующих приборов: акустического доплеровского флоцилографа течений ADCP WH300Hz, CTD-зонда RBR-concerto, оснащенного дополнительными датчиками мутности и хлорофилла-а, турбидиметра Apera Inst. TN400. Проводился отбор проб воды в различных точках плума с целью определения концентрации взвешенного вещества. Для определения прибрежных течений, влияющих на распространение плума, проводились измерения с помощью лагранжевых дрейферных буев, оснащенных GPS-приемниками [3, 4].

Результаты

Каспийское море. В качестве научного полигона в Каспийском море была выбрана приустьевая зона реки Сулак. Река Сулак образуется слиянием горных рек Аварского Койсу и Андийского Койсу. Питание реки смешанное, с преобладанием снегового. Половодье с апреля по сентябрь с максимумом в июне — июле. Поскольку р. Сулак во время половодья выносит огромное количество терригенного вещества, ее плум отчетливо виден на спутниковых изображениях видимого диапазона (рис. 1). Нами проведен сравнительный анализ использования различных алгоритмов для расчета концентрации полного взвешенного вещества (Total Suspended Mater) и мутности (FNU). Было показано, что для разных значений мутности подходят разные алгоритмы. Например, для больших значений мутности лучше всего подходит алгоритм, разработанный под руководством Dogliotti [5]. При значениях мутности менее 50 – 60 FNU, лучше использовать алгоритм, описанный в

работе [6]. На рис. 2 представлены результаты использования двух данных алгоритмов для данных прибора MSI Sentinel-2B, полученных 3 мая 2021 г.



Рис.1. Проявление плюма р. Сулак на цветосинтезированном изображении MSI Sentinel-2A (4, 3, 2 спектральные каналы) от 12 апреля 2012 г.

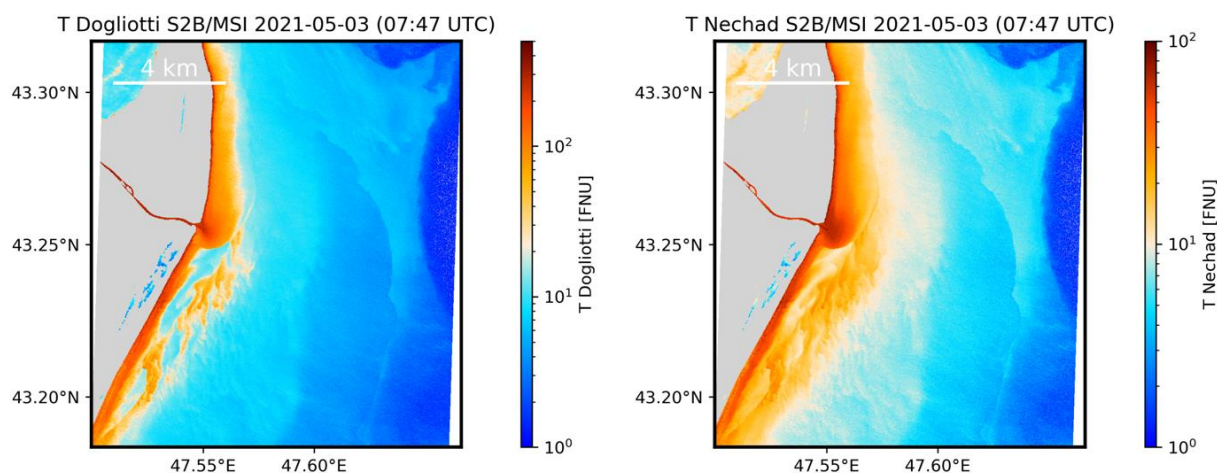


Рис. 2. Карты поверхностного распределения мутности морской воды, восстановленные на основе спутниковых данных Sentinel-2B (MSI), рассчитанные на основе алгоритма Dogliotti (слева) и Nechad (справа) для 3 мая 2021 г.

Черное море. В Черном море, в районе устья р. Мзымта, проведен детальный анализ процесса смешения речных и морских вод, на основе двух экспедиционных работ в апреле 2018 и 2019 гг. [2; 7]. Исследована пространственная и вертикальная структура речного плюма в зависимости от расхода реки, ветрового режима и системы прибрежных течений. Выявлена существенная неоднородность речного плюма в пространстве и высокая

динамическая вариативность во времени, существенно усложняющая задачу сравнения количественных данных дистанционного зондирования и натуральных измерений (рис. 3).

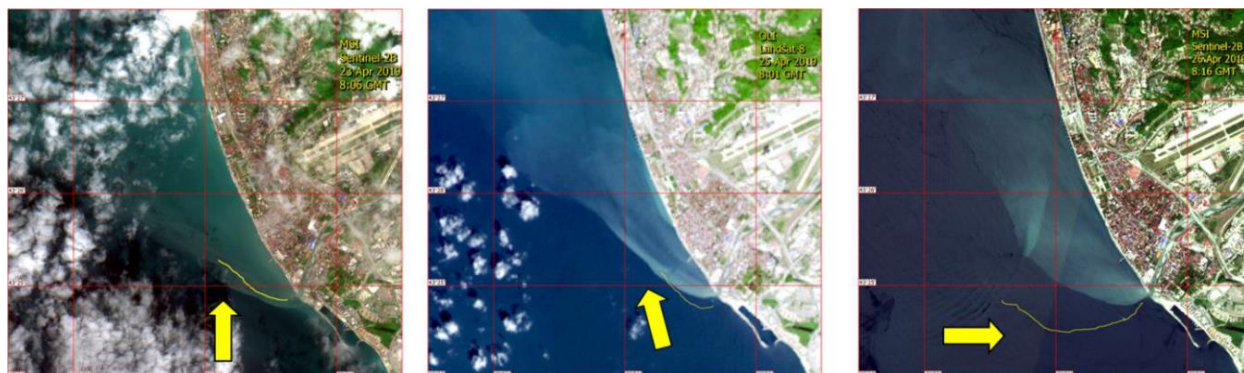


Рис. 3. Оценка скорости изменения положения границы плюма. На изображениях True Color жёлтой линией нанесён GPS-трек вдоль границы речного плюма спустя 3 часа после пролёта спутников. Желтой стрелкой указано направление преобладающих румбов в течение этого времени

Были впервые оценены мелкомасштабные скорости смещения границы речного плюма Мзымты и их связь с направлением ветра. В результате сравнительного анализа разных методов исследования поля мутности, установлена высокая корреляция между значениями мутности проб воды (NTU), измеренная портативным мутномером Apera Inst. TN400 и массовой концентрацией взвеси в пробах в г/л (С). В пробах с содержанием взвеси до 0,05 г/л отмечается простая линейная зависимость между этими величинами, описываемая уравнением $NTU = 1197 * C - 0,7$. При увеличении количества взвеси наблюдаются отклонения от линейной зависимости, как правило выраженные в занижении значений NTU. На основании проведенного рентгенофазового анализа взвеси были установлены закономерности изменения минерального и химического состава морских проб в зависимости от оптических показателей мутности проб (в том числе в зависимости от расстояния до устья реки). Показано, что увеличение мутности сопровождается относительным ростом алевритовой и уменьшением глинистой составляющей в взвеси (рис. 4). Таким образом, показана возможность оценки фазового состава взвеси на основании оптических характеристик.

Балтийское море. Комплексный метод исследования в прибрежной части Гданьского залива в районе выноса вод из Калининградского залива (юго-восточная часть Балтийского моря) позволил выделить основные особенности распространения вод Калининградского залива через Балтийский пролив [8, 9]. На основе архивных спутниковых данных высокого пространственного разрешения для периода с января 2014 г. по сентябрь 2020 г. были проанализированы межгодовая и сезонная изменчивость плюма, образующегося в ходе смешения этих двух водных масс.

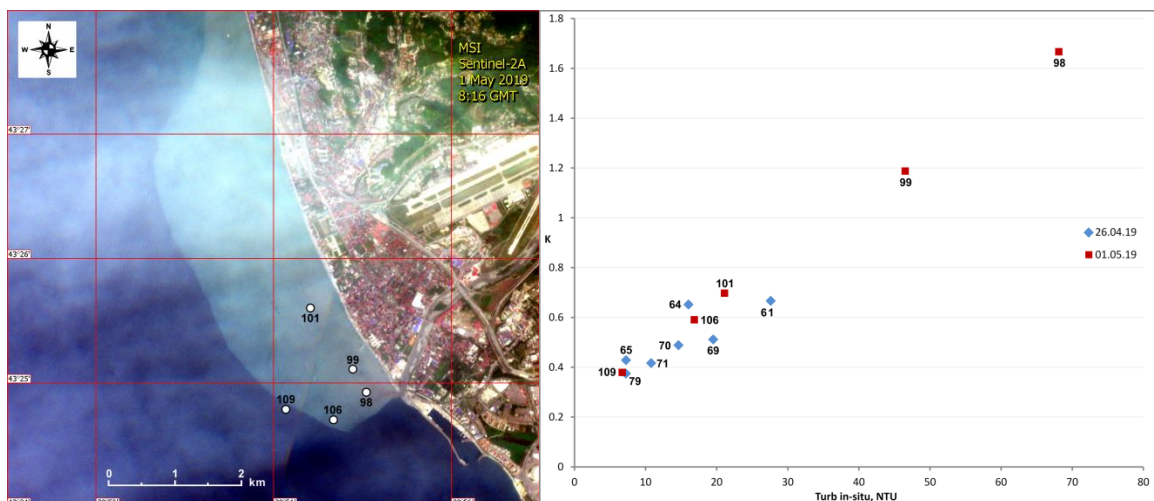


Рис. 4. Слева: фрагмент спутникового изображения Sentinel-2A MSI от 1 мая. Метки указывают места, где были взяты пробы для рентгенофазового анализа. Справа: график показывает отношение процентного содержания кварца в сухом веществе суспензии к процентному содержанию глинистых минералов (К) в зависимости от мутности (Turb in situ, NTU). Номера станций указаны рядом с метками.

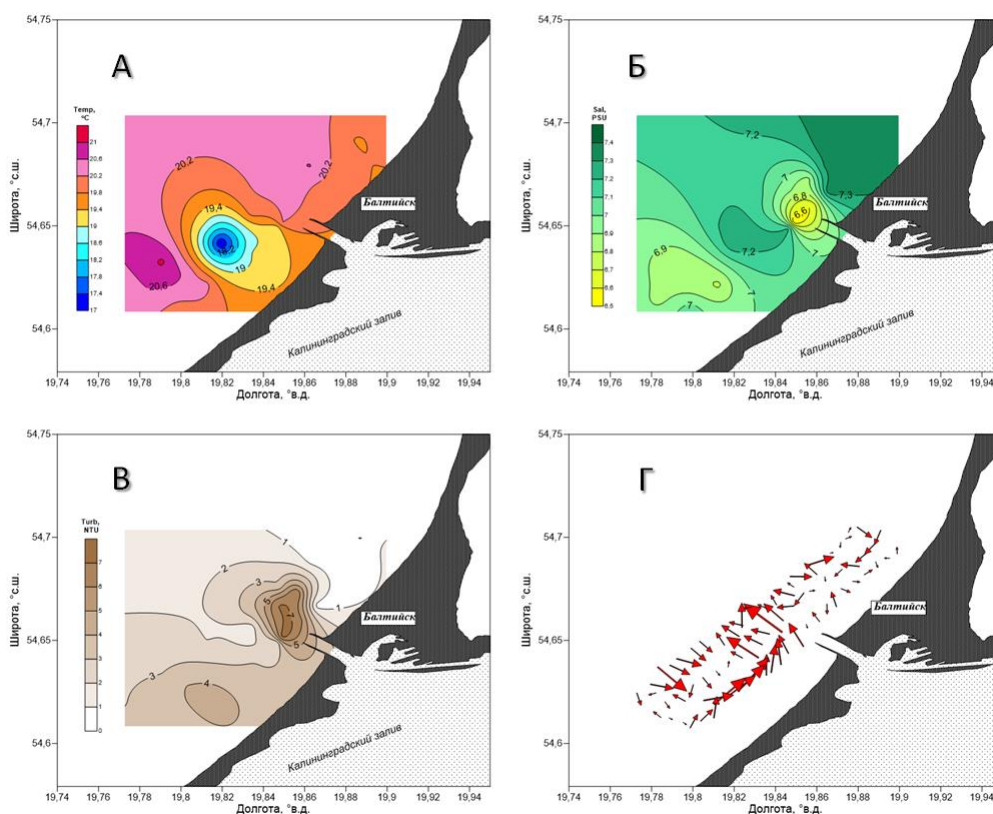


Рис. 5. Карты поверхностного распределения температуры (а), солёности (б), мутности морской воды (в) и поверхностные течения (г) 21 августа 2020 г.

По аналогии с другими районами исследования, данные измерения in-situ были использованы для исследования тонкой вертикальной структуры плюма. Получены данные об основных характеристиках гидрологического режима прибрежной зоны, находящегося под влиянием выноса из Балтийского

пролива. Впервые инструментально была измерена вихревая структура, образовавшаяся на периферии выноса (рис. 5).

Анализ и обработка многолетних рядов спутниковых данных выполнялись при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда – РНФ № 19-77-20060.

Список литературы

1. Завьялов П. О., Маккавеев П. Н., Коновалов Б. В., Осадчиев А. А., Хлебопашев П. В., Пелевин В. В., Грабовский А. Б., Ижицкий А. С., Гончаренко И. В., Соловьев Д. М., Полухин А. А. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308.
2. Назирова К.Р., Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М., Жук Е.В., Алферьева Я.О. Особенности выявления параметров речного плюма контактными и дистанционными методами. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. №2. С. 227–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
3. Krayushkin E., Lavrova O., Stochkov A. Application of GPS/GSM Lagrangian mini-drifters for coastal ocean dynamics analysis // *Russ. J. Earth Sci.* 2019. 19, ES1001, doi:10.2205/2018ES000642.
4. Лаврова О. Ю., Соловьев Д. М., Строчков А. Я., Назирова К. Р., Краюшкин Е. В., Жук Е. В. Использование мини-дрифтеров для проведения подспутниковых измерений параметров прибрежных течений // *Исследование Земли из космоса*. 2019. № 5. С. 36–49. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019536-49>.
5. Dogliotti, A.I.; Ruddick, K.G.; Nechad, B.; Doxaran, D.; Knaeps, E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // *Remote Sens. Environ.* 2015, 156, 157–168.
6. Nechad, B.; Ruddick, K.; Schroeder, T.; Oubelkheir, K.; Blondeau-Patissier, D.; Cherukuru, N.; Brando, V.; Dekker, A.; Clementson, L.; Banks, A.C.; et al. CoastColour Round Robin data sets: A database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters. *Earth Syst. Sci. Data* 2015, 7, 319–348.
7. Nazirova, K.; Alferyeva, Y.; Lavrova, O.; Shur, Y.; Soloviev, D.; Bocharova, T.; Stochkov, A. Comparison of In Situ and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea. *Remote Sens.* 2021, 13, 143. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.
8. Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M., Golenko N. Effect of Wind and Hydrographic Conditions on the Transport of Vistula Lagoon Waters Into the Baltic Sea: Results of a Combined Experiment // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, Issue 9, pp. 5193-5201. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2580602, Jun 29 2016.
9. Krayushkin E., Lavrova O., Nazirova K. Distinctive features of the Vistula lagoon outflow by remote sensing and oceanographic experiments data // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. 2019. V. 11150. 111500W. DOI: 10.1117/12.2533024.

ОЦЕНКА РОЛИ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СНИЖЕНИИ ЭМИССИИ CO₂ И ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИИ РЕГИОНОВ РОССИИ

Л.В. Нефедова

nefludmila@mail.ru

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

***Аннотация.** На основе данных о состоянии развития возобновляемой энергетики, о темпах строительства и ввода в строй ветроэлектростанций (ВЭС) в России проведен анализ роли крупных сетевых ВЭС в энергобалансах регионов и оценка экологического эффекта по снижению эмиссии углекислого газа. Проведенные расчеты показали, что в Республике Калмыкия ВЭС обеспечивают более 94% энергопотребления на промышленные и бытовые нужды. Прогнозные расчеты выработки запланированных к строительству ВЭС до 2024г. характеризуют высокий потенциал ветроэнергетики для покрытия энергопотребления в Республиках Калмыкия и Адыгея, в Ульяновской и Астраханской областях.*

***Ключевые слова.** Возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, солнечная энергетика, энергообеспечение, устойчивое развитие, эмиссия углекислого газа.*

Стоящие перед Россией в соответствии с мировой тенденцией энергоперехода и декарбонизации экономики задачи по развитию возобновляемой энергетики получили последние годы активные решения. В Энергетической стратегии РФ до 2035г. указывается на необходимость увеличения роли использования возобновляемых источников энергии в энергообеспечении страны [1]. В РФ к настоящему моменту создана полноправная отрасль ветроиндустрии, с уровнем локализации более 65%, и стремительными темпами наращивания установленной мощности ВЭС [2]. На конец апреля 2021г. суммарная мощность сетевых ВЭС в стране составляет уже около 1160 МВт, ряд проектов находится в стадии завершения [3]. Прирост выработки электроэнергии (ЭЭ) на ВЭС в 2020г. составил 331% в сравнении с предыдущим годом [4].

Целью работы является анализ возможностей и перспектив возобновляемой энергетики для энергообеспечения регионов и снижения уровня эмиссии углекислого газа путем замещения электростанций на ископаемом топливе на энергообъекты на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) в России. В связи с тем, что последний год в стране был сооружен ряд крупных промышленных ВЭС, проводится анализ объема выработки электроэнергии на данных станциях и уровня использования установленных мощностей. На основании проведенного анализа с учетом характера региональных энергобалансов поставлена задача оценить возможный уровень объемов покрытия потребностей в электроэнергии ветроэнергетикой в настоящее время и на перспективу расширения выработки электроэнергии на ВЭС к 2024г. При проведении исследования использованы

расчетные статистические метода, прогнозно-аналитические методы, экономико-географический анализ и экспертные оценки.

Базой для проведения расчетов послужили материалы компаний – производителей энергии, Системного оператора Единой энергосистемы (СО ЕЭС) России, статистические данные Госкомстата РФ и НП «Совет рынка»

Ввод в эксплуатацию крупных ветроэнергетических станций в РФ был начат в конце 2017 г. в Ульяновской области. Наиболее активно процесс строительства и ввода в строй идет в южных регионах России (Ростовская область, Ставропольский край, Республики Адыгея и Калмыкия). Все станции были введены в строй здесь менее чем за последние полтора года – за очень напряженный по эпидемиологической обстановке период 2020 года и начало 2021 года. Рост производства энергии от ВЭС в РФ был обеспечен введением в строй ВЭС суммарной мощностью 85 МВт в 2017-2018гг. (Ульяновская область), 843, 8 МВт в 2020г., 230 МВт в 2021 г. Суммарная мощность ВЭС России, введенных в строй по программе ДПМ-1, на 1.05.21г. составляет 1158,8 МВт. Для всех данных ВЭС (табл.1) нами были проведены оценки перспективной среднегодовой выработки электроэнергии, оценена их современная роль в энергобалансах регионов, а также проведены расчеты снижения эмиссии CO₂ («невыбросы») энергокомплекса за счет введения в строй экологически чистых ЭС, а не на углеродном топливе. Помимо рассмотренных нами ВЭС в РФ работают также 21 ВЭС, построенных без государственной поддержки, суммарной мощностью 105,76 МВт. Сюда входят и 7 ВЭС, общей мощностью 83,8 МВт, расположенные в Республике Крым и построенные до 2014 г. [2]. Они имеют значительно более низкий К и ум и были исключены из расчетов.

Проведенный анализ материалов Системного оператора Единой энергетической системы России показал, что в 2020 году выработка электроэнергии сетевыми электростанциями ЕЭС России, составила 1047 029,9 млн кВт·ч (снижение к объему производства электроэнергии в 2019 году - 3,1%). В том числе распределение годового объема производства электроэнергии по типам электростанций было следующее в сравнении с 2019г. [4]:

- ТЭС – 620 565,1 млн кВт·ч (снижение производства на 8,7%);
- ГЭС – 207 416,3 млн кВт·ч (увеличение производства на 9%);
- АЭС – 215 682,1 млн кВт·ч (увеличение производства на 3,3%);
- ВЭС – 1 384,1 млн кВт·ч (увеличение производства на 331,4%);
- СЭС – 1 982,3 млн кВт·ч (увеличение производства на 54,3%).

Таким образом, значительный прирост выработки электроэнергии наблюдался в 2020г. только в сфере возобновляемой энергетики, и в первую очередь – в ветроэнергетике.

Исходя из данных о производстве электроэнергии на ВЭС -1384,1 млн кВт·ч и номинальной выработки всех ВЭС в Ульяновской, Ростовской областях и Республике Калмыкия за 2020 г., введенных в строй в 2017-2020 гг., составившей по нашим оценкам 4839,5 млн кВт·ч, было вычислено среднее значение коэффициента использования установленной мощности

(Киум) ВЭС в 2020 г. составившее в 28,6%. Для ВЭС в Ставропольском крае и в Республике Адыгея (ВЭС Кочубеевская, Кармалинская и Адыгейская) были использованы проектные данные по выработке, представленные на официальном сайте АО «Нова Винд» [5]. При этом среднегодовое значение Киум составляет от 32,45% на Кочубеевской ВЭС до 26,93% на Адыгейской ВЭС.

Таблица 1

Оценка потенциала сокращений выбросов CO₂ и производства электроэнергии на действующих ВЭС в регионах России (по состоянию на 1.05.2021 г.)

Субъект РФ, ВЭС	Дата ввода в экспл.	Мощность, МВт	Среднегодовая выработка ЭЭ, млн кВтч/год	Потребление ЭЭ в регионе 2019г. млн кВтч	Доля ЭЭ ВЭС в энергобалансе	Сокращение выброса, CO ₂ тыс.т.
Ульяновская область:		85,4	214,00	5581,8		107,1
ВЭС 1	28.12.17	35	87,7			43,9
ВЭС 2	28.12.18	50,4	126,3			63,2
Ростовская область:		436,8	1094,3	19324,1	5,7%	547,2
Сулинская ВЭС	28.02.20	98,8	247,5			123,8
Каменская ВЭС	28.04.20	98,8	247,5			123,8
Гуковская ВЭС	25.05.20	98,8	247,5			123,8
Казачья ВЭС	23.11.20	50,4	126,3			75,1
Азовская ВЭС	29.04.21	90,0	225,5			112,1
Республика Калмыкия:		216,6	542,5	573,2	94,6%	271,3
Юстинская ВЭС	29.10.20	15	37,5			18,9
Салынская ВЭС	19.11.20	100,8	252,5			126,2
Целинская ВЭС	27.11.20	100,8	252,5			126,2
Республика Адыгея :		150,0	354,0	1434,6	24,7%	177,0
Адыгейская ВЭС АО «НоваВинд»	28.02.20-27.04.20	150,0	354,0			177,0
Ставропольский край:		270	744,0	10354,9	7,2%	372,0
Кочубеевская ВЭС «НоваВинд»	28.12.20-28.01.21	210	597,0			298,5
Кармалиновка ВЭС «НоваВинд»	29.03.21	60	147,0			73,5
Итого по РФ:		1158,8	2948,8			1474,4

Составлено автором с использованием данных и материалов [3,4,5,6]

Для расчетов доли покрытия энергопотребления были проведены сопоставления объемов выработки электроэнергии на ВЭС региона и объема энергопотребления субъекта РФ по данным Росгостата [6]. Оценки потенциала сокращения выбросов парниковых газов за счет наращивания мощностей ВЭС проведены из расчета, что производство электроэнергии в России в среднем сопровождается выбросами около 500г CO₂/кВт *час [7].

Как видно из табл.1 в Калмыкии ветроэнергетика уже в настоящее время покрывает более 94% энергопотребления в республике, а в Республике

Адыгея – около 25%. Лидером по суммарной установленной мощности ВЭС в России является Ростовская область – 436,8 МВт. В этом крупном регионе ветроэнергетика уже обеспечивает 5,7% промышленного и бытового энергопотребления.

В 2013-2020гг состоялись конкурсы по отбору проектов на строительство ВЭС в регионах России до 2024 г. в соответствии с политикой поддержки развития возобновляемой энергетики на условиях Договоров на предоставление мощности (ДПМ). К 2024 г. запланировано (с уже состоявшимися конкурсными отборами на строительство ВЭС) 3569,11 в 13-ти регионах России [3]. Оценка выработки электроэнергии, исходя из сохранения и в перспективе среднего Киум 28,6% на ВЭС России, запланированных к строительству до 2024 г. и объемов сокращения эмиссии CO₂ на них представлена в табл. 2. Также были выполнены прогнозные расчеты возможной доли покрытия ветроэнергетикой промышленного и бытового энергопотребления в регионах к 2024 г, исходя из положения о сохранении суммарного энергопотребления на уровне 2019 г.

Расчеты показали, что суммарное снижение эмиссии углекислого газа благодаря не использованию на ВЭС ископаемого углеродного топлива составит около 4,5 млн т CO₂. Доля ветроэнергетики к 2025 г.в энергобалансах будет максимальной в Республиках Калмыкия и Адыгея (около 99% и 44% энергопотребления соответственно). Также она будет значительна (более 10%) в Ульяновской и Астраханской областях, Краснодарском Крае.

Таблица 2

Оценка перспективной роли ВЭС России, запланированных к строительству до 2024г., в энергобалансах регионов России

Регион РФ	Проекты строительства ВЭС до 2024г. МВт	Потенциал выработки электроэнергии млн кВт*ч/год	Потребление электроэнергии в регионе 2019г. млн кВт*ч/год	Перспективная доля к 2024г. ВЭС в энергобалансе региона	Сокращение выброса CO ₂ , тыс.т.
Астраханская обл.	183,00	458,4	4370,2	10,5%	229,2
Волгоградская обл	77,40	193,9	16238,9	1,2%	97,0
Краснодарский край	1052,50	2635,3	24772,2	10,6%	2317,6
Ростовская область	503,69	1261,7	19324,1	6,9%	630,9
Республика Адыгея	250,00	626,3	1434,6	43,7%	313,2
Республика Калмыкия	226,10	566,4	573,2	98,8%	283,2
Ставропольский край	173,95	435,7	10354,9	4,2%	217,9
Ульяновская обл.	316,00	791,6	5581,8	14,2%	395,8
Республика Татарстан	100,00	250,5	30952,5	0,8%	125,3
Мурманская обл.	350,97	879,2	12727,6	6,9%	439,6
Оренбургская обл.	75,6	189,4	16413,8	1,2%	94,7
Пермский край	189,90	475,7	26207,2	1,8%	237,9
Курганская обл.	40,00	100,2	1353,5	7,4%	50,1
ИТОГО	3569,11	8941,9			4471,0

Составлено автором с использованием данных и материалов [3,4,6]

Заключение

Проведенные в работе расчеты и оценки роли ветроэнергетики в энергообеспечении регионов России показали, что эта отрасль уже заняла свое значительное место. Суммарное снижение эмиссии углекислого газа благодаря не использованию на ВЭС ископаемого углеродного топлива составит ежегодно около 4,5 млн т CO₂. Доля ветроэнергетики к 2025 г. в энергобалансах будет максимальной в Республиках Калмыкия и Адыгея (около 99% и 44% энергопотребления соответственно). Также она будет значительна (более 10%) в Ульяновской и Астраханской областях, Краснодарском Крае. При этом необходимо отметить, что в Республике Калмыкия с низким общим энергопотреблением построенные к 2024. объекты на ВИЭ (СЭС – 164,5 МВт, ВЭС – 226,1 МВт) переведут Калмыкию в энергоизбыточные субъекты РФ, а ветроэнергетика полностью обеспечит промышленное и бытовое энергопотребление в республике. Строительство крупных сетевых ВЭС повысит надежность энергоснабжения в ряде регионов России, улучшит экологическую ситуацию и обеспечит сокращение выбросов CO₂, что особенно важно для южных рекреационных регионов России.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года // Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 года №1523-р.
2. Обзор российского ветроэнергетического рынка за 2020 год // РАВИ, Сколково, 2021, 52 с.
3. Официальный сайт Ассоциации «НП Совет рынка», URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm> (дата обращения 30.04.21)
4. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2020 г. // Системный оператор Единой энергосистемы., М., Минэнерго, 2021, 34 с. Официальный сайт АО «СО ЕЭС» URL: www.so-eps.ru (дата обращения 30.04.21)
5. Официальный сайт АО «НоваВинд» URL: <http://novawind.ru/production/our-projects/> (дата обращения 30.04.21)
6. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики (Росстат), URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения 30.04.21)
7. Углеродоемкость электроэнергии в мире и России // Энергетический бюллетень Аналитического центра при Правительстве РФ, вып. 72, май, 2019, с. 14-18.

ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

С.И. Пряхина, Е.И. Ормели

meteokatenok@mail.ru

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

Саратовская область по географическому положению и климатическим условиям является одним из основных производителей высококачественного зерна, в частности сортов сильных и твердых пшениц. Регион расположен в зоне рискованного земледелия и недостаточного увлажнения. Поэтому сельское хозяйство всегда испытывает большие трудности в получении высоких и устойчивых урожаев, что отрицательно сказывается на экономике всего агропромышленного комплекса.

Глобальное потепление климата, которое наблюдается в конце XX в. начале XXI в., значительно повлияло на погодные и климатические условия области, а, следовательно, и на производство зерновой продукции в целом.

В основу написания данной статьи положен ежедневный метеорологический материал по пяти станциям Саратовской области за 2005-2017 гг., по станции Саратов ЮВ за 1941-2017 гг., а также полевой материал за 30-летний период, где авторы принимали непосредственное участие.

Объективно подойти к выделению климатических сезонов и их фаз в Саратовской области позволил анализ хода радиационного баланса, характера изменений подстилающей поверхности, ежедневного хода синоптических процессов и погодных условий, средней суточной, максимальной и минимальной температуры и характера осадков за 77-летний период. Годовой динамике природных процессов региона соответствуют четыре сезона. Лето и зима характеризуются трехфазной структурой, а переходные сезоны - двухфазной. Главные погодные характеристики сезона наиболее ярко выражаются в течение центральной его фазы, которая обычно является и самой продолжительной. Основные сезоны летний и зимний - длятся 4,5 – 5 месяцев, а переходные - около месяца.

Региональное потепление климата значительно проявилось в холодный период года. Сдвинулись границы климатических сезонов года. В среднем переход средней суточной температуры воздуха через 0°С осенью сдвинулся на 7 дней и приходится на 12 ноября, в весеннее время переход через 0°С сдвинулся на более ранние сроки и приходится на 26 марта (норма 2 апреля). Поэтому продолжительность зимнего периода сократилась на 15 дней и составляет в среднем 133 дня (норма 148 дней). Если в 40-е-50-е годы продолжительность зим составляла в среднем 144-146 дней, то в последние два десятилетия (2000-2010 гг., 2011-2017 гг.) отмечались самые короткие зимы, их продолжительность составила соответственно 119 и 123 дня [1].

За каждый день по ежедневному фактическому материалу с ноября по март были подсчитаны среднесуточные отрицательные температуры воздуха.

Расчет сумм температур показал, что самое холодное десятилетие наблюдалось в 40-е годы (1941-1951 гг.), когда сумма температур составила минус 1221,4°С. В результате сокращения продолжительности зимнего периода и потепления климата из рис. 1 четко видно, что каждое последующее десятилетие отмечалось меньшей суммой отрицательных температур. Следовательно, наблюдалось значительное повышение температурного режима зимних месяцев. Последние 6 лет (2011-2017 гг.) считаются самыми теплыми, сумма температур составила всего минус 782,4°С (рис. 1).

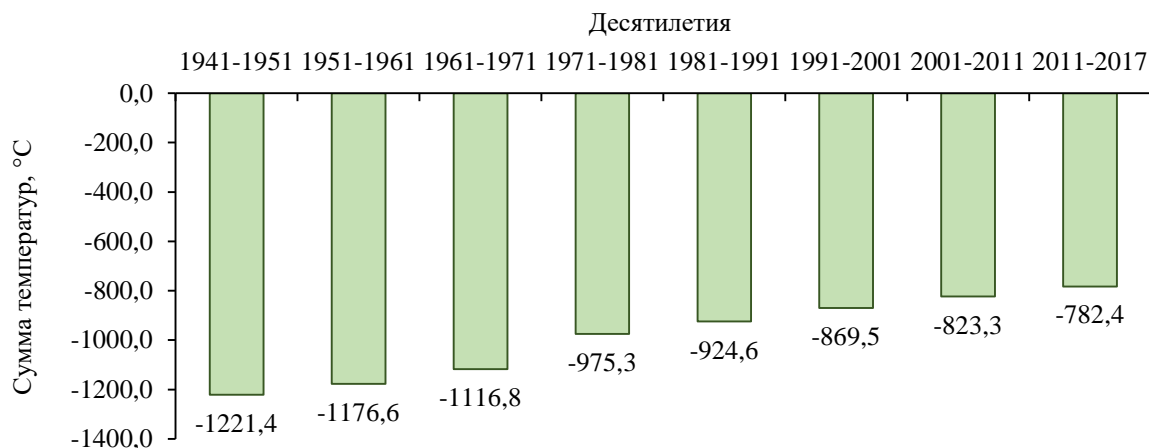


Рис. 1 Сумма средних суточных отрицательных температур воздуха за зимний период (ноябрь-март), °С, станция Саратов ЮВ, 1941-2017 гг. (по десятилетиям)

Такое потепление зимнего сезона повлияло и на среднемесячные температуры зимних месяцев – они значительно стали теплее. За последние 3 десятилетия температура в январе колеблется в пределах минус 7°С – минус 9°С, когда норма составляет -11°С.

С потеплением зимних месяцев значительно улучшились условия перезимовки озимых культур в регионе. Авторами были выделены три комплекса благоприятности перезимовки озимых культур, в основу которых положен процент гибели растений к началу весеннего обследования. Самая высокая оценка в три балла была дана зимам, когда наблюдалась только естественная гибель растений и составляла не более 10%. К таким зимам относились разные по термическому режиму зимы, с хорошими осадками, при высоте снежного покрова более 25 см, и отсутствовали неблагоприятные явления, приводивших к значительной гибели озимых культур. Зимы оценивались в два балла, когда гибель озимых культур составляла от 10% до 25%. К таким зимам относились холодные зимы с небольшим снежным покровом, а также теплые зимы с высоким снежным покровом. Здесь наблюдались такие неблагоприятные явления как притертая ледяная корка. В один балл оценивались зимы, когда гибель озимых культур составляла более 25%. Это неустойчивые зимы, с резкими перепадами температуры, частыми оттепелями, и пониженными температурами, приводившими к вымерзанию и образованию ледяных корок.

По данным статистического управления Саратовской области гибель озимых культур в 40-е-60-е годы составляла до 40%, в особо холодные годы

до 60%. С потеплением климата гибель озимых значительно уменьшилась. В табл. 1 представлены суммы отрицательных температур за ноябрь-март по десятилетиям, процент гибели озимых культур, высота снежного покрова и балльная оценка.

Таблица 1

Оценка погодных условий по степени благоприятности перезимовки озимых культур, станция Саратов ЮВ, 1962-2017 гг. (по десятилетиям)

Десятилетия	Суммы ср. сут. температур воздуха, °С (ноябрь-март)	Высота снежного покрова, см (февраль-март)	Количество плохих посевов, %	Характеристика зимы	Оценка в баллах
1962-1971	-1154,3	26,2	23,2	Нормальная	1,7
1971-1981	-975,3	26,5	19,5	Нормальная	2,4
1981-1991	-924,6	29,2	16,7	Нормальная	2,2
1991-2001	-869,5	28,7	14,1	Нормальная	2,4
2001-2011	-823,3	32,7	-	Нормальная	-
2011-2017	-782,4		-	Теплая	-
1962-2017	-922,0	28,6	-	-	2,2

С потеплением климата и увеличением теплых зим сокращается повторяемость зим с оценкой в 1 балл и увеличивается повторяемость зим с оценкой в 2 и 3 балла.

Самая большая повторяемость неблагоприятных зим с оценкой в 1 балл наблюдалась в 60-е годы прошлого столетия, когда гибель озимых в среднем составила 23%. В последующие десятилетия гибель озимых монотонно уменьшается. В 90-е годы гибель озимых составляла от 16 до 14%, что близко к естественной гибели озимых.

Весенний сезон в Саратовской области самый яркий, короткий и активный. Продолжительность его составляет 25-30 дней и состоит из двух фаз: «снеготаяние» и «разгар весны». Фазы тесно связаны с переходом температуры через 0°, 5°, 10°C. От 0° до 5°C - фаза снеготаяния и от 5° до 10°C начинается вегетация растений, проводятся все весенние полевые работы и посев ранних яровых культур [3].

По увлажненности весенней вегетации за 77 летний период (1941-2017 гг.) по станции Саратов ЮВ были выделены влажные, умеренно-засушливые и сухие годы. Повторяемость влажных весен составила 28 лет (36,4%), когда сумма осадков за апрель-май составляла более 120% от нормы более 86,4 мм (норма апреля 29 мм, мая 43 мм, сумма осадков за апрель- май 72 мм). Такие условия увлажнения достаточно обеспечивают растения влагой и способствуют оптимальному их развитию. Повторяемость умеренно-засушливых весен составила 15 лет (19,5%). Сумма осадков за апрель-май изменялась от 80 до 120% от нормы (от 57,6 мм до 86,4 мм). При таких условиях растения недостаточно обеспечены влагой. Повторяемость сухих весен составила 34 года (44,2%). Сумма осадков за апрель-май наблюдалась

менее 80% от нормы (менее 57,6 мм). Растения сильно страдают от засухи, слабо проходит кущение, что сильно сказывается на урожайности.

При переходе температуры воздуха через 10°C начинается летний период – фаза «предлетье».

Региональное потепление климата в Саратовской области в летний период было оценено по суммам активных температур. По станции Саратов расчеты велись с 1941 по 2017 гг., по станциям Саратовской области с 2005 по 2017 гг.

С нарастанием сумм активных температур увеличивается повторяемость засух. В табл. 2 приведены значения сумм активных температур по станциям Саратовской области.

Таблица 2

Сумма активных температур за летний период с температурой выше 10°C по станциям Саратовской области

Год	Хвалынский	Балашов	Саратов	Ершов	Ал.Гай
2005	2933,70	2839,50	3007,60	2956,20	3197,50
2006	2858,00	2748,70	2941,60	2929,00	3192,10
2007	3018,60	2926,70	3086,40	3067,70	3309,40
2008	2817,20	2663,50	2865,80	2805,40	3053,20
2009	2957,70	2808,70	3007,90	2961,30	3154,40
2010	3431,50	3376,70	3471,50	3474,40	3660,60
Среднее 2005-2010 гг.	3002,7	2894	3063,5	3032,3	3261,2
2011	2933,50	2902,80	3034,90	2995,40	3268,10
2012	3003,80	2953,30	3170,60	3212,70	3403,80
2013	2987,70	2819,70	2954,30	2997,10	3201,80
2014	2938,80	2891,20	2989,10	3016,30	3248,80
2015	2806,70	2890,50	3086,30	3125,40	3316,00
2016	2863,20	2823,50	3025,50	2995,60	3209,50
2017	2699,30	2681,10	2794,20	2846,70	3116,20
Среднее 2011-2017 гг.	2890,4	2851,7	3007,8	3027	3252
Среднее 2005-2017 гг.	2942,2	2871,2	3033,5	3029,5	3256,2

В последние три десятилетия по станции Саратов ЮВ наблюдается сумма активных температур, превышающая 3000°C. Термические ресурсы, при правильном их использовании, дают возможность возделывать поздние зерновые культуры на семена, а также возделывать некоторые культуры два раза за вегетационный период. Такое нарастание тепла требует правильной и четкой расстановки зерновых культур по их потребности продолжительности дня и к термическим условиям, в полевые севообороты необходимо вводить разные группы культур, учитывая их биологические и экологические свойства.

Таблица 3

Сумма активных температур выше 10°C по станции Саратов ЮВ за 1941-2017 гг.
(по десятилетиям)

Десятилетия	Сумма активных температур
1941-1950	2672,0
1951-1960	2895,2
1961-1970	2846,3
1971-1980	2895,4
1981-1990	2894,8
1991-2000	3049,6
2001-2010	3199,4
2011-2017	3116,4
Среднее 1941-2017 гг.	2946,0

Главная особенность климата региона – частая повторяемость засух и суховеев. Из табл. 4 видно, что от десятилетия к десятилетию происходит нарастание засух.

Таблица 4

Показатель засух гидротермического коэффициента по интенсивности и повторяемость засух за три десятилетия по станции Саратов ЮВ (1981-2011 гг.)

Показатель оценки засух	Класс засух по интенсивности				
	Очень сильная засуха класс 1	Сильная засуха класс 2	Средняя засуха класс 3	Слабая засуха класс 4	Отсутствие засухи класс 5
Гидротермический коэффициент по Селянинову (ГТК)	$\leq 0,19$	0,20-0,39	0,40-0,60	0,61-0,75	$\geq 0,76$
Десятилетия	Повторяемость засух:				
1981-1990	-	1	2	1	6
1991-2000	-	1	4	1	4
2001-2011	-	1	2	4	4

В первом десятилетии повторяемость засух наблюдалась в 4-х случаях из 10, во втором десятилетии – в 6 случаях, в третьем десятилетии – в 7 случаях. Нарастают в основном засухи средней и слабой интенсивности. По А.И. Руденко слабые засухи характеризуются снижением урожайности на 10-15%, средние – на 25% [2].

Осень — переходный климатический сезон от лета к зиме, в течение которого угасают признаки лета, появляются и возрастают признаки приближающейся зимы. Началу осени соответствует устойчивый переход средней суточной температуры воздуха через 10°C. В конце осени отмечается колебание температуры около 0°C. Осенний сезон на территории области короткий – в среднем составляет 40-45 дней.

В условиях Саратовской области основным неблагоприятным фактором, от которого зависит состояние озимых перед прекращением осенней

вегетации, является недостаточная влагообеспеченность растений в этот период. Для оценки характера увлажненности осеннего периода использовались критерии, разработанные П.Г. Кабановым. На основании многолетних наблюдений за погодой и развитием озимых культур по характеру орошенности предпосевного и посевного периода в Поволжье выделены 3 резко отличающиеся друг от друга типа погоды: влажный, умеренно-засушливый и сухой.

Для первого типа характерна сумма осадков за август-сентябрь 80 мм, что обеспечивает достаточное увлажнение пахотного слоя почвы, нормальные всходы и хорошее развитие озимой пшеницы в осенний период. Для второго типа сумма осадков составляет 50-80 мм – при таких условиях наблюдаются изреженные, неравномерные всходы. Третий тип характеризуется сухой погодой перед посевом озимых, когда сумма осадков за август и сентябрь в этом случае не превышает 50 мм.

Проведенные исследования позволили выделить осени по степени увлажненности. В среднем за 77-летний период сумма осадков за август–сентябрь составила 81,3 мм. Десятилетия не отражают полной картины увлажнения территории из-за неравномерного выпадения осадков год от года. Бывают годы, когда за август-сентябрь выпадает более 150 мм (1950, 1977, 1990, 1993, 2013 гг.) или, наоборот, менее 50 мм (1949, 1957, 1965, 1972, 1998, 2005, 2010, 2015 гг.).

В табл. 5 представлена оценка погодных условий по степени благоприятности осеннего периода вегетации и количество баллов за этот период по десятилетиям. Средний балл осени за рассматриваемые годы составил 2,1 из 3-х возможных.

Таблица 5

Оценка погодных условий по степени благоприятности для осенней вегетации озимых культур, станция Саратов ЮВ, 1941– 2017 гг. (по десятилетиям)

Десятилетия	Число дней со ср. сут. температурой воздуха от 10° до 0°С. Условия закаливания	Сумма осадков за август-сентябрь, мм	Тип погоды	Оценка в баллах
1941-1950	36 (удовлетворительная закалка)	85,4	Влажный	2,1
1951-1960	39 (удовлетворительная закалка)	65,9	Умеренно-засушливый	2,0
1961-1970	49 (хорошая закалка)	86,9	Влажный	2,3
1971-1980	46 (хорошая закалка)	85,4	Влажный	2,0
1981-1990	39 (удовлетворительная закалка)	83,7	Влажный	2,1
1991-2000	33 (удовлетворительная закалка)	94,1	Влажный	2,3
2001-2010	35 (удовлетворительная закалка)	68,3	Умеренно-засушливый	1,7
2011-2017	37 (удовлетворительная закалка)	80,2	Влажный	2,0
1941-2017	39 (удовлетворительная закалка)	81,3	Влажный	2,1

Проведенная оценка осенних сезонов показала, что повторяемость благоприятных типов погодных условий в период осенней вегетации озимых культур составила 28 лет (36%), удовлетворительных – 26 лет (34%) и неблагоприятных – 23 года (30%) (табл.6).

Таблица 6

Повторяемость типов погодных условий по степени благоприятности для осенней вегетации озимых культур, станция Саратов ЮВ, 1941– 2017 гг. (по десятилетиям)

Десятилетия	Типы погодных условий			Оценка в баллах
	Благоприятные	Удовлетворительные	Неблагоприятные	
1941-1950	4	3	3	2,1
1951-1960	2	6	2	2,0
1961-1970	5	3	2	2,3
1971-1980	4	2	4	2,0
1981-1990	4	3	3	2,1
1991-2000	4	5	1	2,3
2001-2010	2	3	5	1,7
2011-2017	3	1	3	2,0
1941-2017	28	26	23	2,1

Так как повторяемость хороших и удовлетворительных сезонов составила 70%, можно говорить о благоприятных условиях осеннего сезона для вегетации озимых культур. Плохие условия осенней вегетации составили 30% и были связаны в основном с недостатком влаги в почвенном слое.

Рекомендации производству:

1. С потеплением климата, увеличением высоты снежного покрова и уменьшением продолжительности зимнего периода создаются благоприятные условия для перезимовки озимых культур, что способствует расширению клина озимых культур на территории Саратовской области.

2. Со смещением границ климатических сезонов года весенний сезон приходится на более ранние сроки, что необходимо учитывать при выполнении весенних полевых работ и сева всех типов зерновых культур.

3. Территории с негарантированным земледелием требуют возделывать несколько типов зерновых культур с асинхронным наступлением фаз развития: озимые, ранние и поздние яровые.

Список литературы

1. Пряхина С.И., Гужова Е.И., Кузнецова С.А., Злобин Р.И. Влияние глобального потепления на перезимовку озимых культур / Известия Саратовского университета. Новая Серия. Серия: Науки о Земле. Том 12. Выпуск 2. 2012. – С. 37–40.

2. Грингоф И.Г., Пасечнюк А.Д. Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения / СПб: Гидрометеоиздат, 2005. – 552 с.

3. Пряхина С.И., Ормели Е.И. Агроклиматическая характеристика сезонов года Саратовской области / Известия Саратовского университета. Новая Серия. Серия: Науки о Земле. Том 18. Выпуск 4. 2018. – С. 243-247.

МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ

^{1,2}И.А. Репина, ²В.М. Степаненко, ¹Н.В. Вазаева, ³Г. Ганбат
repina@ifaran.ru

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия, г. Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, г. Москва

³Информационно-исследовательский институт метеорологии, гидрологии и окружающей среды, Монголия, Улаанбаатар

Аннотация. В статье представлены данные дистанционного зондирования в ИК и видимом о формировании мезомасштабного вихря над монгольским озером Убсу-Нур. Рассматриваются метеорологические условия возникновения вихря, его влияние на ледообразование и погодные условия прибрежных территорий. Вихрь плохо разрешается реанализом, но перспективен для оценки его параметров с использованием мезомасштабных моделей.

Ключевые слова. Озерные эффекты, мезомасштабные циркуляции, холодные вторжения, дистанционное зондирование.

Озера являются важным элементом земной климатической системы, покрывая около 3% поверхности суши. Взаимодействие между озером и атмосферой оказывает существенное влияние на региональный климат [1]. Из-за маленького альбеда, высокой теплоемкости и небольшой шероховатости поверхности озера режим обмена теплом и импульсом озера и атмосферы существенно отличается от режима обменных процессов на суше [2]. Это приводит к пространственной неоднородности радиационных и турбулентных потоков в регионах, где озера покрывают большую часть поверхности Земли [3,4]. Кроме того, большие озера уменьшают суточную изменчивость температуры воздуха в регионе [5]. Они могут служить значимым источником поступления в атмосферу тепла, влаги, а также парниковых газов, в особенности, углекислого газа и метана. Существование мезомасштабных явлений над озерами хорошо известно. Контраст между температурой озера и суши приводит к формированию озерного бриза, который меняет местное поле ветра [6]. Озерный бриз может взаимодействовать с топографией и фоновым ветром и вызывать конвективные процессы [7]. При наличии горного рельефа возможно формирование кatabатических ветров, в том числе и сильных. Летом механизмы бризовой и горно-долинной циркуляций на прибрежных склонах усиливают друг друга, что может приводить к высоким локальным значениям скорости ветра в дневное время. В умеренных и высоких широтах в осенний период поверхность озера оказывается теплее выхолаженных над сушей воздушных масс, что при холодных вторжениях воздуха с суши на поверхность озера приводит к формированию конвективных циркуляций. Возникающие при этом облачные структуры принимают форму как классических конвективных валиков, так и

мезомасштабных вихрей [8-10], а на подветренной стороне озёр возможно выпадение рекордных сумм осадков. Это явление хорошо известно на примере Великих Американских озёр [11,12] и Великого Соленого озера в штате Юта [13-15], где «озерные снегопады» наносят большой удар по экономике и транспортным системам регионов: из-за влияния озёр годовое количество осадков увеличивается на 200% по сравнению с соседними районами [16]. Мезомасштабные явления над озерами и окружающими территориями могут создавать опасные явления для авиации (при взлёте и посадке самолётов), морского транспорта и сельского хозяйства. При наличии горного рельефа и резких сезонных колебаний температуры воздуха вероятность возникновения мезометеорологических процессов усиливается. С этой точки зрения большие озера Восточной Сибири и Северной Монголии, представляют особый интерес для проведения исследований. В Сибири и Монголии существуют и солёные озера (например, оз. Чаны в Западной Сибири, оз. Убсу-Нур в Северной Монголии), процессы взаимодействия с атмосферой которых остаются исследованными недостаточно [17,18].

Например, обнаруженный нами по спутниковым данным мезомасштабный вихрь, ежегодно формирующийся над озером Убсу-Нур в осенний период [8,17] оказывает существенное влияние на формирование ледяного покрова и, вероятно, по аналогии с Великими Американскими озерами [9], приносит экстремальные осадки, но найти даже географическое описание этого явления нам не удалось, при том, что его повторяемость и локализация гораздо более явная, чем у подобных явлений на Американских озерах.

Для анализа динамики вихря использовались спутниковые изображения облачности в ИК диапазоне спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 31 канал, разрешение 1 км в надире), полученные с веб-сайта LAADS (Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System, https://ladsweb.nascom.nasa.gov/browse_images/), а также данные глобальных реанализов NCEP-NCAR, ERA-Interim, MERRA, CFSR.

Озеро Убсу-Нур (монг. Увс нуур, Увс) – крупнейшее озеро Монголии с площадью 3350 км², располагающееся на северо-западе страны. Вода в озере солёная. Со второй половины XX века средняя минерализация вод озера имела тенденцию к падению (с 180 мг/л в 1930 г. до 140 мг/л в 2000 г. Максимальная глубина озера составляет 22 м. Климат в бассейне озера резко-континентальный с малым годовым количеством осадков (143 мм) и выраженным годовым ходом температуры воздуха (средняя температура июля 20⁰С, января -32⁰С).

В ноябре на фоне холодных вторжений на относительно теплую поверхность озера формируется интенсивный мезомасштабный вихрь размером несколько десятков километров. По своим свойствам (взрывной характер формирования, наличие глаза) вихрь идентичен полярным мезоциклонам и предполагает большие скорости ветра. Ветер разрушает тонкий новообразованный ледяной покров. Холодные вторжения формируют кататические потоки с горных хребтов на западе и юге озера (рис. 1).

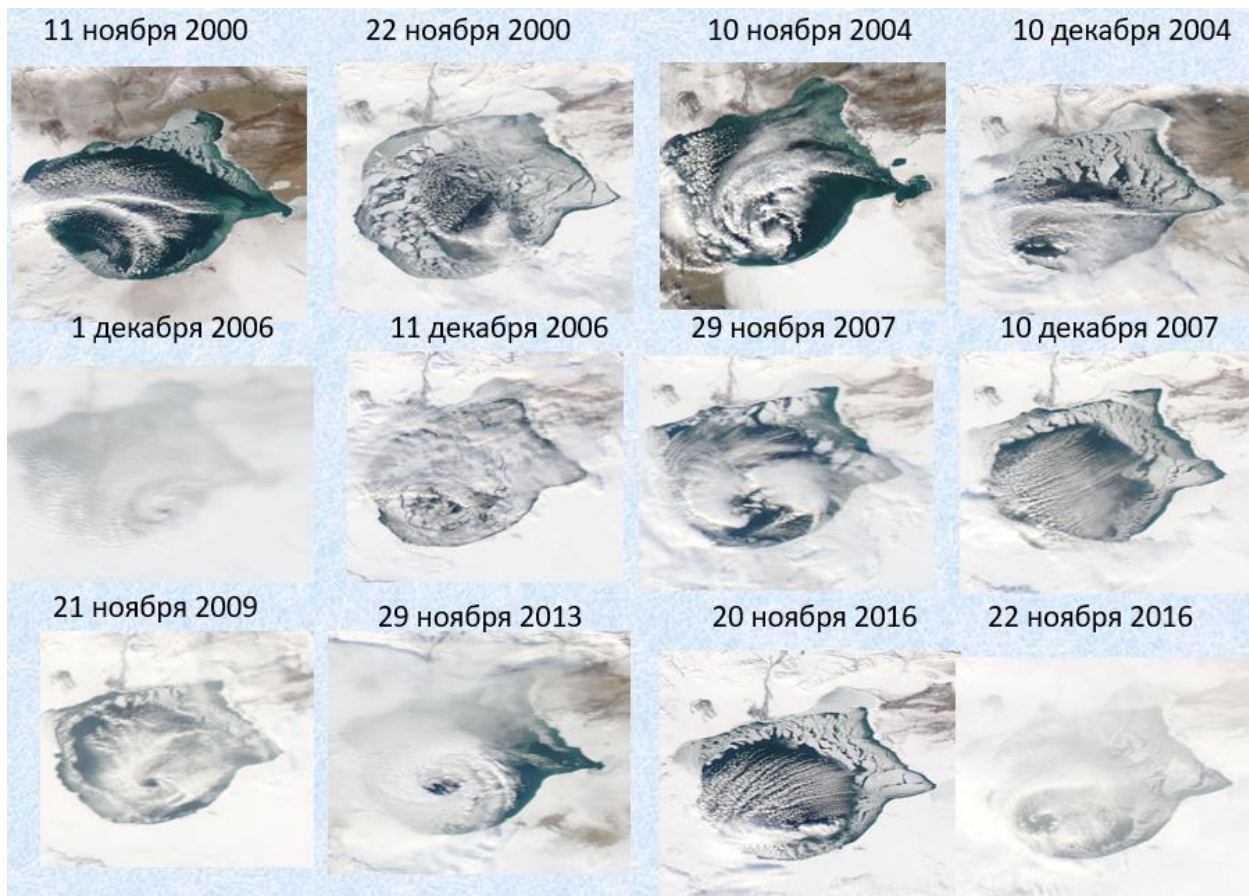


Рис. 1. Снимки скатерометра MODIS в видимом диапазоне. Район монгольского озера Убсу-Нур

Вихрь охватывает практически все озеро, может существовать до нескольких суток (рис. 2) и, в частности, способствует позднему установлению ледяного покрова на озере, разрушая тонкий молодой лед.

Анализ метеорологических условий на ближайшей к озеру метеорологической станции Улангом показывает, что формирование вихря происходит на фоне падения температуры воздуха и усиления ветра. Реальную скорость ветра без привлечения мезомасштабного моделирования установить проблематично. Реанализ MERRA при существовании вихря показывает ветровую аномалию в районе озера, но дает явно заниженные скорости ветра. Реанализ ERA5 удовлетворительно воспроизводит общий характер наблюдаемой на спутниковом снимке циркуляции. В реанализе NCEP наблюдается повышение температуры воздуха над озером, но характерных изменений циркуляции не заметно.

Для численного моделирования была выбрана открытая исследовательская негидростатическая мезомасштабная атмосферная модель WRF-ARW – Weather Research and Forecasting (Версия 4.1.1) [19]. Данная модель является одной из наиболее универсальных и отлаженных открытых систем моделирования атмосферы. Численный эксперимент проведен с подбором схем турбулентности, наиболее полно и адекватно воспроизводящих наблюдаемую картину, и позволяет проанализировать поля

скорости, температуры, долю облачного покрова, проследить направление циркулирующих потоков.

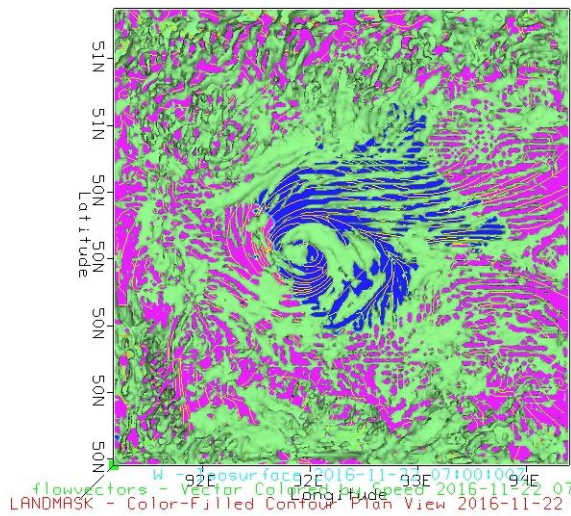


Рис. 2. Эволюция вихря на озере Убсу-Нур на снимках в видимом и ИК- диапазоне

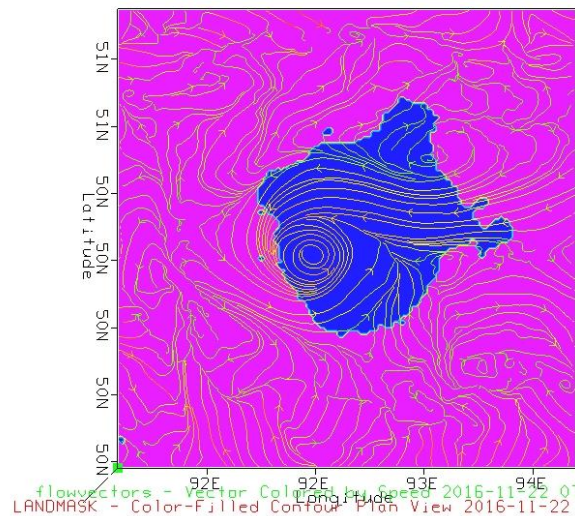
Численное моделирование случая проводилось на расчетной области с вложенными сетками, 540×540 км с шагом 9 км, 219×219 км с шагом 3 км, 151×151 км с шагом 1 км. Для первой области использовался спектральный наджинг («spectral nudging»). В центре области расположено озеро УВС-Нуур – объект исследования. Включен дополнительный блок расчета озер.

Результаты моделирования показывают хорошее совпадение со спутниковыми данными. Рассмотрим моделирование с шагом 1 км для 22 ноября 2016 г., 07 и 08 UTC (см. рис. 1). Изоповерхности вертикальной скорости (0,02 м/с), четко визуализирующие образовавшиеся организованные структуры на рис. 3 (а,г), по аналогии со структурами тропических циклонов можно назвать индикаторами смерчегенеза и конвективной ячейки. На рис. 3б отдельно показаны линии тока горизонтальной скорости ветра, на рис. 3в хорошо визуализируется конвективная ячейка.

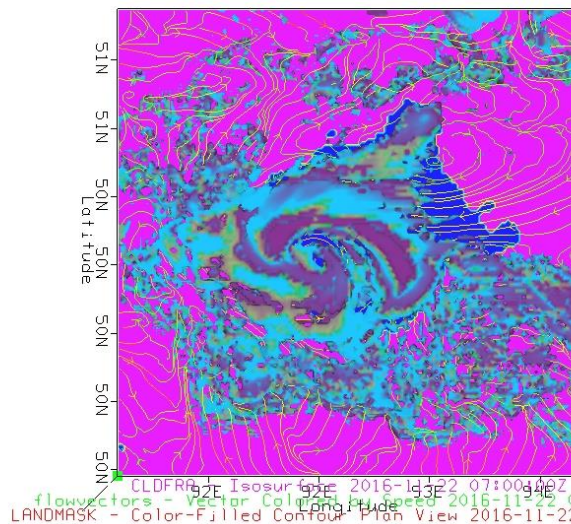
a)



б)



в)



г)

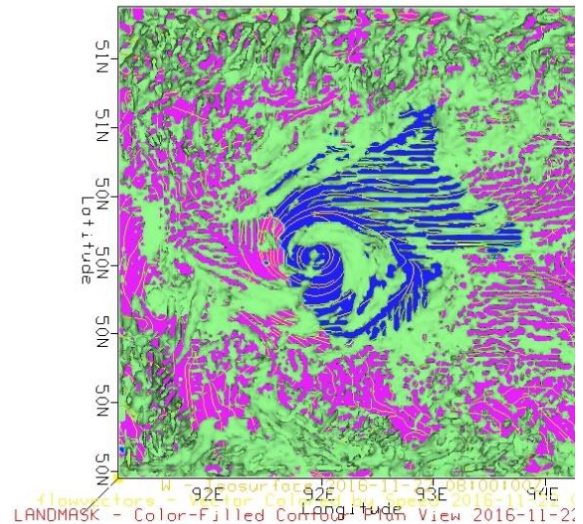


Рис. 3. Моделирование озерного вихря 22 ноября 2016 г. а) Исоповерхности вертикальной скорости для уровней: 800-1000 гПа (0,02 м/с), линии тока горизонтальной скорости на уровне 900 г Па (изменение цвета векторов в зависимости от скорости: желтые – 7 м/с, красные – 11 м/с), б) Линии тока горизонтальной скорости на уровне 900 г Па, в) Доля облачности для уровней: 825-1000 гПа, линии тока горизонтальной скорости на уровне 900 г Па, г) Исоповерхности вертикальной скорости для уровней: 800-1000 гПа (0,02 м/с), линии тока горизонтальной скорости на уровне 900 г Па

Выполненное исследование показывает, что обнаруженный нами по данным дистанционного зондирования озерный вихрь является важной составляющей динамики атмосферы в регионе. Возможно его влияние на влажностный режим прибрежных территорий, а также на время ледостава на озере. Для дальнейшего анализа его динамики и структуры необходимо привлекать мезомасштабное моделирование.

Работы выполнены при поддержке РФФИ, грант № 19-55-44028 Монг.т.

Список литературы

1. Adrian R. et al. Lakes as sentinels of climate change // *Limnol. Oceanogr.* 2009. V. 54(6). P. 2283–2297.
2. Bonan G.B. Sensitivity of a GCM simulation to inclusion of inland water surfaces // *J. Clim.* 1995. V. 8(11). P. 2691–2704.
3. Martynov A., Sushama L., Laprise R., Winger K., Dugas B. Interactive lakes in the Canadian Regional Climate Model, version 5: the role of lakes in the regional climate of North America // *Tellus A.* 2012. V. 64.
4. Stepanenko V.M., Martynov A., Johnk K.D., Subin Z.M., Perroud M., Fang X., Beyrich F., Mironov D., Goyette S. A one-dimensional model intercomparison study of thermal regime of a shallow, turbid midlatitude lake // *Geosci. Model Dev.* 2013. V. 6(4). P. 1337.
5. Samuelsson P., Kourzeneva E., Mironov D. The impact of lakes on the European climate as simulated by a regional climate model // *Boreal Environment Research.* 2010. V. 15(2). P.113-129.
6. Samuelsson P., Tjernström M. Mesoscale flow modification induced by land-lake surface temperature and roughness differences // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2001. T. 106. №. D12. C. 12419-12435.
7. Gerken, T., Biermann T., Babel W., Herzog M., Ma Y.M., Foken T., Graf H.F. A modelling investigation into lake-breeze development and convection triggering in the Nam Co Lake basin, Tibetan Plateau // *Theor. Appl. Climatol.* 2014. V. 117(1-2). P. 149–167.
8. Репина И.А., Степаненко В.М. Влияние атмосферных процессов на формирование ледового режима озера Убсу-Нур (Монголия) // Шестнадцатая Всероссийская Открытая конференция Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов) Сборник тезисов. ИКИ РАН Москва, 2018. С. 207–207.
9. Forbes G.S., Merritt G.H. Mesoscale Vortices over the Great Lakes in Wintertime Monthly // *Weather Review.* 1984. V. 112(2). P. 377-381.
10. Mulholland J.P., Frame J., Nesbitt S.W., Steiger S.M., Kosiba K.A., Wurman J. Observations of misovortices within a long-lake-axis-parallel lake-effect snowband during the OWLeS Project // *Monthly Weather Review.* 2017. V. 145(8). P. 3265-3291.
11. Bates G.T., Giorgi F., Hostetler S.W. Toward the simulation of the effects of the Great Lakes on regional climate // *Mon. Weather Rev.* 1993. V. 121. P. 1373–1387.
12. Vavrus S., Notaro M., Zarrin A. The role of ice cover in heavy lake-effect snowstorms over the Great Lakes Basin as simulated by RegCM4 // *Monthly Weather Review.* 2013. V. 141(1). P. 148-65.
13. Carpenter D.M. The lake effect of the Great Salt Lake: Overview and forecast problems // *Wea. Forecasting.* 1993. V. 8. P. 181–193.
14. Alcott T., Steenburgh W.J. Orographic influences on a Great Salt Lake-effect snowstorm // *Mon. Wea. Rev.* 2013. V. 141. P. 2432–2450.
15. Steenburgh, W.J., Halvorson S.F., Onton D.J. Climatology of lake-effect snowstorms of the Great Salt Lake // *Mon. Wea. Rev.* 2000. V. 128. P. 709–727.
16. Scott R.W., Huff F.A. Impacts of the Great Lakes on regional climate conditions // *J. Great Lakes Res.* 1996. V. 22. P. 845–863.
17. Степаненко В.М., Репина И.А., Ганбат Г., Даваа Г. Моделирование ледового режима соленых озер // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана.* 2019. Т. 55. № 1. 152–163.
18. Nidhi N., Lin Z. Impacts of salinity parameterizations on temperature simulation over and in a hypersaline lake // *Chinese J. Oceanography Limnology.* 2014. V. 33(41130961). P.790–801.
19. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 2. In NCAR Tech. Note 2008.

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ДОННЫХ ОСАДКАХ МЕЛКОВОДНЫХ БУХТ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО

А. А. Рюмина, Е.М. Шкирникова, П.Я. Тищенко

ryumina.aa@poi.dvo.ru

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Россия, г. Владивосток*

Значительная часть тяжелых металлов, поступающих с материковым стоком, аккумулируется в донных осадках прибрежных акваторий. По этой причине химический состав донных осадков прибрежной зоны несет важную информацию о их поступлении в морскую среду.

Одним из факторов, определяющим накопление и распределение тяжелых металлов в донных осадках, являются органические вещества, как поступающие с терригенным стоком, так и аутогенного происхождения, в частности, образующиеся при функционировании фитобентоса.

Целью данной работы является исследование вертикального распределения свинца, меди, цинка и органического углерода в донных осадках трех мелководных бухт залива Петра Великого, две из которых (Воевода и Новгородская) имеют значительные площади, покрытые морской травой (*Zostera Marina L.*), в третьей (залив Угловой) морские травы практически отсутствуют.

Пробы донных осадков отобраны во время прибрежной экспедиции лаборатории гидрохимии в 2019 г. в точках с координатами: 43°00.434' с.ш. 131°47.149' в.д. и 42°59.882' с.ш. 131°47.558' в.д. (бухта Воевода); 42°39.323' с.ш. 130°52.326 в.д. и 42°38.132 с.ш. 130°55.334 в.д. (бухта Новгородская.); 43°18.774' с.ш. 132°00.902' в.д. и 43°14.621' с.ш. 131°58.650' в.д. (залив Угловой).

Металлы определялись методом атомно-абсорбционной спектрометрии на аппарате Shimadzu AA-3600. Общий органический углерод - определялся на анализаторе TOC-VCPN Shimadzu.

Керны осадков отобраны с помощью прямоточной геологической трубкой (1 м). Отбор кернов сопровождался видеосъемкой.

Каждый керн был разделен на 7–9 интервалов опробования по 8–10 см каждый и на 3 фракции в зависимости от размера частиц (меньше 0,2 мм, от 0,2 мм до 0,5 мм и больше 0,5 мм). В работе приводятся данные для пяти кернов для фракций с размером зерна меньше 0,2 мм, представленные в табл. 1.

При сравнении профилей металлов по глубине видно следующее.

1) Концентрации микроэлементов донных осадков залива Угловой и бухты Новгородской мало зависят от глубины донных отложений и содержания органического углерода.

2) Концентрации микроэлементов в донных отложениях, отобранных в бухте Воевода существенно выше, особенно в керне, взятом в зарослях

зостеры морской (Воевода-1). Для бухты Воевода существует линейная корреляция между концентрациями микроэлементов и содержанием органического углерода. Эту корреляционную связь можно объяснить физиологическими особенностями зостеры. В листьях зостеры синтезируется полисахарид – зостерин. Это вещество является природным комплексоном по отношению к тяжелым металлам. При отмирании травы органокомплексы обогащают донные осадки микроэлементами и органическим углеродом [1].

В заливе Угловой наблюдались минимальные концентрации свинца и органического углерода, несмотря на сильное антропогенное воздействие на акваторию залива [1]. На наш взгляд, данный факт объясняется отсутствием на дне водоема растительности.

Таблица 1

Содержание химических элементов и органического углерода по глубине в донных осадках бухте Воевода

Интервал опробования, см	Pb, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	C _{орг} , %
Воевода -1				
0-5	37	91	204	6,01
5-15	27	75	142	3,72
15-25	25	78	150	3,67
25-35	25	58	110	3,24
35-45	21	41	95	2,13
45-54,5	18	37	90	1,94
54,5-64,5	21	39	98	1,89
Воевода -2				
0-10	35	29	108	3,03
10-20	26	28	100	2,54
20-30	28	26	96	2,43
30-40	29	26	94	1,99
40-50	26	25	92	1,74
50-60	27	28	97	1,95
60-73	26	26	91	1,92

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, № 20-05-00381-а и программы фундаментальных научных исследований, тема № 0211-2021-0014.

Список литературы

1. Христофорова Н.К., Чернова Е.Н. Сравнение содержания тяжелых металлов в бурых водорослях и морских травах// Доклады академии наук. 2005. Т. 400. №4. С. 571-573.
2. Лосев О.В. Анализ источников загрязнения залива Угловой (залив Петра Великого) и факторов его загрязненности // Вестник ДВО РАН. 2019. № 2. С. 95 – 103.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ СЕЙСМИЧНОСТИ: МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ (НА ПРИМЕРЕ КАМЧАТКИ)

В.А. Салтыков

salt@emsd.ru

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Россия, г. Петропавловск-Камчатский

Введение

Информация о текущем состоянии сейсмичности отдельного региона является достаточно широко востребованной. В круг заинтересованных лиц входят не только члены сейсмологического сообщества, но и структуры, по роду своей деятельности связанные с мониторингом природной среды (в частности, МЧС, административные структуры). Отдельной проблемой является предоставление информации о землетрясениях населению сейсмоактивных областей.

Учитывая широкий диапазон потребителей такой информации, используемые характеристики должны иметь, с одной стороны, интуитивно понятный смысл, а с другой – их определение должно опираться на количественные параметры сейсмического процесса. Традиционным решением является создание шкал, переводящих числовые показатели в качественные характеристики. Подобная ситуация встречается во многих отраслях науки: например, в океанографии состояние моря оценивается по 9-бальной шкале, исходя из высоты волн; 12-бальная шкала Бофорта предназначена для оценки силы ветра и т.д.

Формализация данной процедуры позволяет избежать ряда неоднозначностей при описании, оценке и сравнении сейсмического режима различных пространственно-временных объемов. Например, при составлении заключений о состоянии или прогнозе сейсмической обстановки многие исследователи используют понятие «*сейсмического фона*». Как правило, определение «*сейсмического фона*» не приводится, что ведет к недоразумениям при использовании таких заключений.

В государственном стандарте “Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов” [1], в разделе, регламентирующем мониторинг землетрясений, присутствует понятие “*уровня сейсмического фона*”, как одного из требуемых параметров. Однако, в этом разделе ГОСТа лишь поясняется о чем идет речь – «*о пространственно-временном распределении слабых землетрясений*», то есть определение этого понятия не введено. Таким образом, разработка шкалы уровня сейсмичности соответствует потребностям организаций, ответственных за организацию и ведение мониторинга сейсмичности, удовлетворяющего требованиям упомянутого государственного стандарта.

Другая проблема связана с выбором параметра, характеризующего уровень сейсмичности. Представляется, что использование абсолютных параметров, например, таких как активность A_{10} , выделившаяся сейсмическая энергия E и т.д., не является оправданным по ряду причин.

Предлагается для характеристики уровня сейсмичности конкретной пространственно-временной области использовать эмпирическую функцию распределения F суммарной выделившейся сейсмической энергии E (рис. 1). Тогда, задавая пороговые значения F и зная выделившуюся энергию E , мы можем сделать заключение о повышенной либо пониженной сейсмической активности региона.

Выбор сейсмической энергии как исходного параметра обусловлен ее более высокой устойчивостью по отношению к качеству каталога. Использование в тех же целях числа землетрясений N или активности A_{10} предъявляет достаточно высокие требования к однородности и полноте используемого каталога. Энергия E ведет себя гораздо более устойчиво, так как практически вся выделившаяся энергия определяется наиболее сильными землетрясениями.

Учитывая статистический характер базового параметра, предложенная методика получила название *Статистическая Оценка Уровня Сейсмичности* – «СОУС'09».

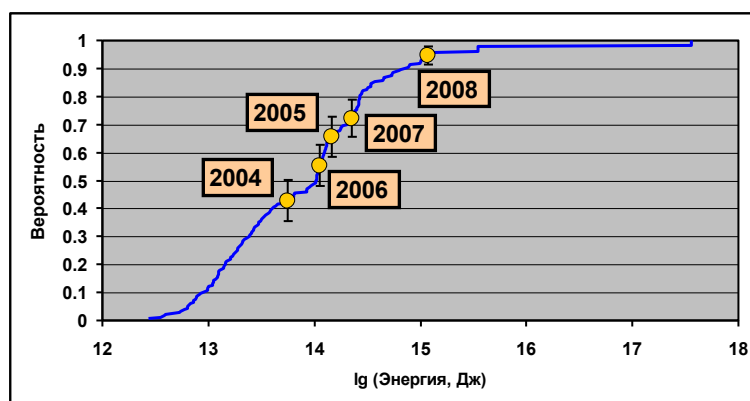


Рис. 1. Функция распределения сейсмической энергии, выделившейся за один год, для Прибайкалья-Забайкалья. Отмечены значения функции распределения для 2004–2008 гг.

Алгоритм «СОУС'09» [3]

Пусть нашей задачей является оценка уровня сейсмичности заданной пространственной области в интервале времени (T_1, T_2) .

По данным однородного каталога землетрясений строится эмпирическая функция распределения для выделившейся сейсмической энергии во временном интервале $\Delta T = T_2 - T_1$. Длительность каталога имеет большое значение: по ней определяется точность оценок.

Используя набор функций распределения F для различных временных интервалов ΔT , можно получить зависимость любого квантиля распределения энергии $K(F)$ от временного окна ΔT . В качестве опорных квантилей предлагается использовать $K(0.995)$, $K(0.975)$, $K(0.85)$, $K(0.15)$, $K(0.025)$, $K(0.005)$. Как пример, приведены такие зависимости для Камчатки (рис. 2). Рассчитанные значения квантилей для набора значений ΔT (в представленном

примере $\Delta T=7$ сут., 15 сут., 1 мес., 3 мес., 6 мес., 1 год, 3 года) аппроксимируются монотонной кривой.

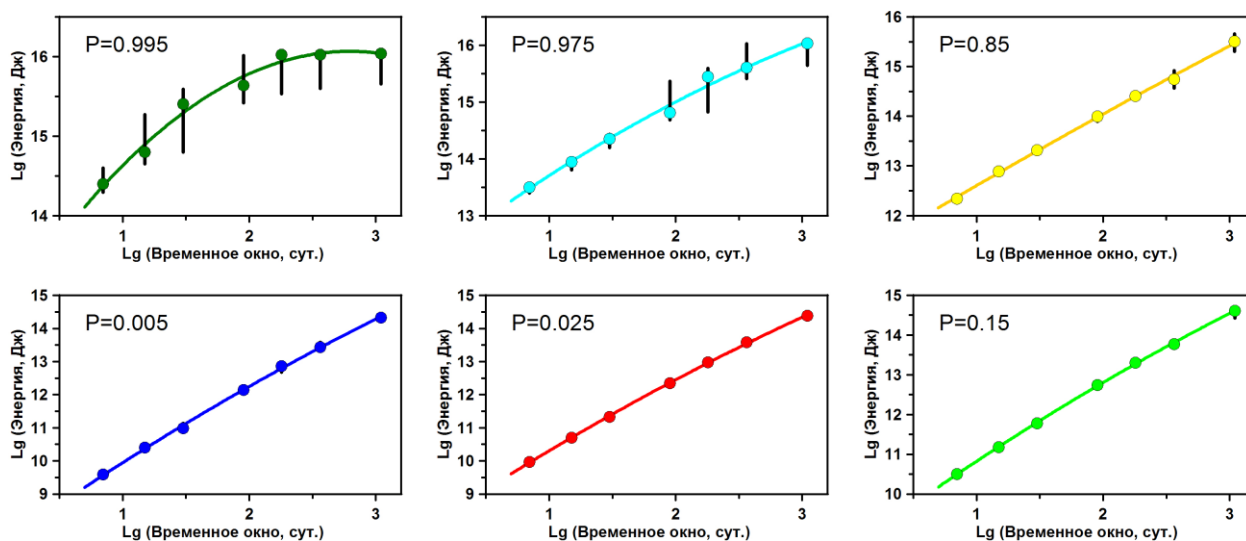


Рис. 2. Зависимость опорных квантилей распределения сейсмической энергии для Камчатки от величины временного интервала ΔT

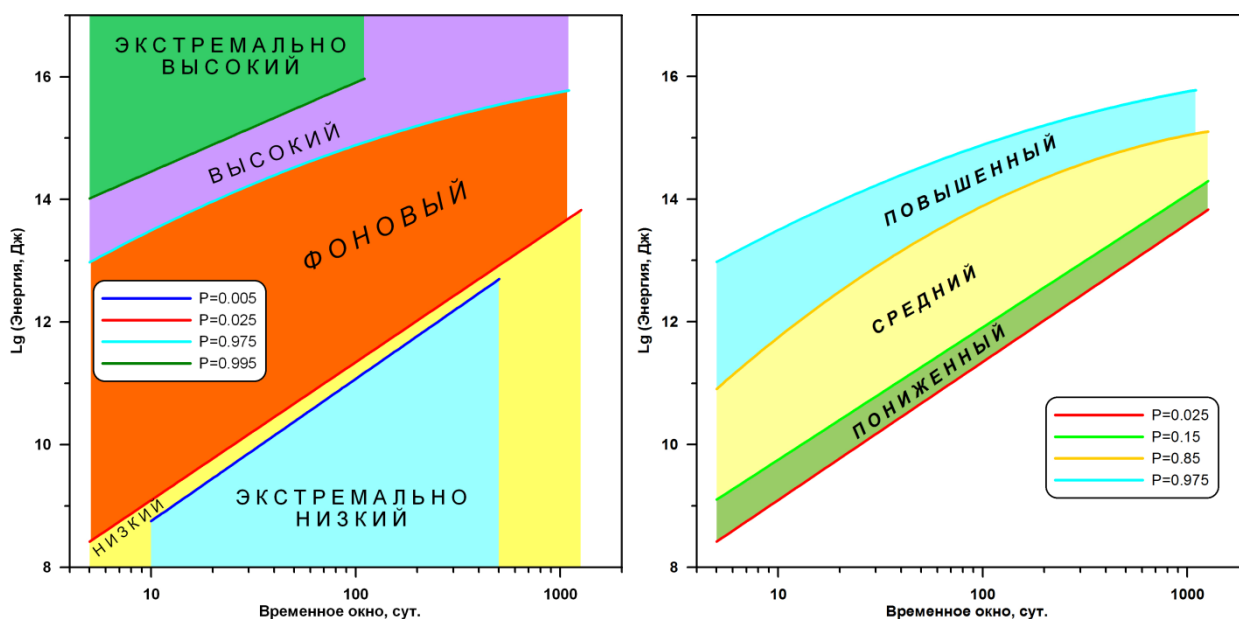


Рис. 3. Номограмма «СОУС'09» для Прибайкалья и Забайкалья: *слева*: для основной шкалы в пять градаций уровня сейсмичности; *справа*: дополнительное разбиение «фонового» уровня на три подуровня

Представленные на едином графике аппроксимации формируют номограмму (рис. 3), которая позволяет дать качественную оценку сейсмического режима в любой конкретный отрезок времени (T_1, T_2). Для этого необходимо знать лишь величину сейсмической энергии E , выделившейся за это время.

Предлагается следующая шкала уровней сейсмичности:

- экстремально высокий – $K(0.995) \leq \lg E$,
- высокий – $K(0.975) \leq \lg E < K(0.995)$,

- фоновый – $K(0.025) < \lg E < K(0.975)$,
- низкий – $K(0.005) < \lg E \leq K(0.025)$,
- экстремально низкий – $\lg E \leq K(0.005)$.

Согласно такой градации в 95% случаев сейсмичность находится на фоновом уровне. При необходимости его можно разбить на три подуровня:

- фоновый (пониженный) – $K(0.025) \leq \lg E < K(0.15)$,
- фоновый (средний) – $K(0.15) < \lg E < K(0.85)$,
- фоновый (повышенный) – $K(0.85) \leq \lg E < K(0.975)$.

В дополнение к шкале уровней сейсмичности можно использовать понятие нормы выделившейся сейсмической энергии, подобно тому, как аналогичные понятия применяются, например, в метеорологии. Норму предлагается определить, как медианное значение сейсмической энергии, выделившейся за временной интервал ΔT , рассчитанное по данным всего каталога конкретной пространственной области.

Данная методика имеет определенные ограничения применения, связанные с нижним уровнем энергии используемых землетрясений, с величиной анализируемого временного интервала и с длительностью каталога землетрясений.

Примеры использования методики СОУС'09

1. Оценка уровня сейсмичности региона или конкретного объекта (например, вулкан или разломная зона)

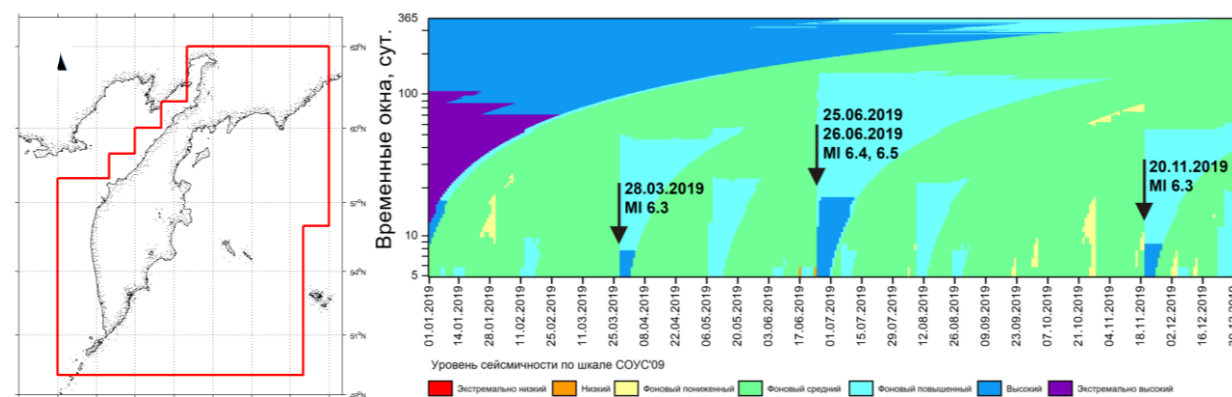


Рис. 4. Диаграмма уровня сейсмичности в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН в различных временных окнах

В качестве примера (рис. 4) показана СОУС-грамма, отражающая в цветовых кодах временной ход уровня сейсмичности для всей зоны ответственности Камчатского филиала ЕГС РАН. Диапазон временных окон – от 5 до 365 сут. Здесь следует обратить внимание на то, что произошедшее сильное землетрясение переводит сейсмичность на высокий уровень на коротких временных интервалах, оставляя ее на среднем фоновом уровне для длинных интервалов. То есть оценка СОУС всегда должна сопровождаться указанием величины временного интервала.

2. Обнаруженный эффект – относительно кратковременное предвестниковое затишье, не выявленное другими методами.

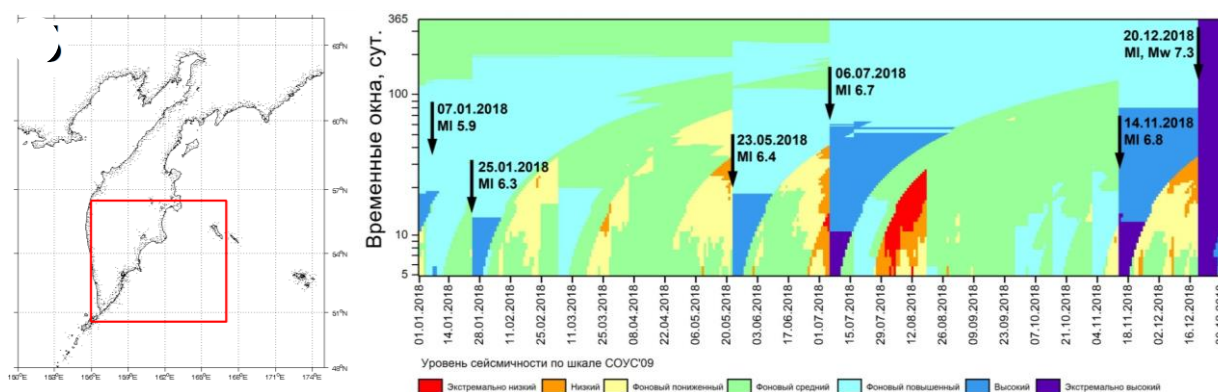


Рис. 5. Диаграмма уровня сейсмичности Камчатской сейсмоактивной области (КСО) в различных временных окнах

Сейсмические затишья, предваряющие сильные землетрясения, являются одним из часто встречающихся предвестников. Нами было многократно обнаружено кратковременное сейсмическое затишье – снижение регионального уровня сейсмичности до низкого, а иногда до экстремально низкого уровня в коротких (до 1 месяца) окнах перед землетрясениями магнитуды $M=6-7$. В качестве примера на рис. 5 представлены такие затишья перед землетрясениями 23.05.2018, 06.07.2018, 14.11.2018, 20.12.2018.

3. Мониторинг состояния вулканов.

Методика СОУС'09 используется при мониторинге состояния активных вулканов Камчатки, где плотные сейсмические сети обеспечивают приемлемый уровень представительности каталога землетрясений, учитывая существенно более низкую энергетику вулканических землетрясений (по сравнению с тектоническими).

Вулкан Толбачик (Подготовка Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013) [2].

27 ноября 2012 г. на Камчатке началось одно из крупнейших извержений, отмеченных в последние десятилетия на территории России, - Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия Института вулканологии ДВО РАН (ТТИ-50). Подготовка этого извержения нашла отражение в сейсмическом процессе. Временной ход уровня сейсмичности в районе вулкана (область $R=10$ км, диапазон глубин до 30 км) в 2012 г. представлен на рис. 6. В июле-ноябре 2012 г. выявлен статистически значимый переход уровня сейсмичности с фонового на высокий, а затем на экстремально высокий уровень, что соответствует многократному увеличению числа землетрясений и выделившейся сейсмической энергии. Уход с фонового уровня отмечается с августа 2012 г. Последние три недели перед трещинным прорывом 2012 г. сейсмичность анализируемого сейсмоактивного объема находилась на экстремально высоком уровне.

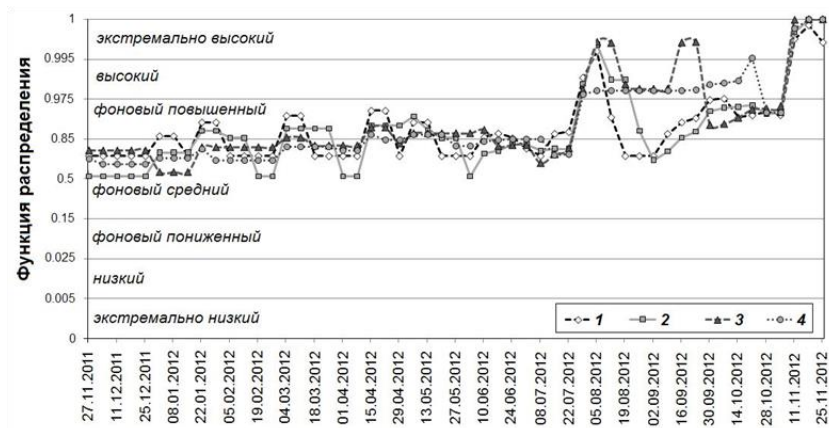


Рис. 6. Временной ход уровня сейсмичности в различных временных окнах (1 – 15 суток, 2 – 30 суток, 3 – 60 суток, 4 – 90 суток) за один год до начала извержения 27 ноября 2012 г.

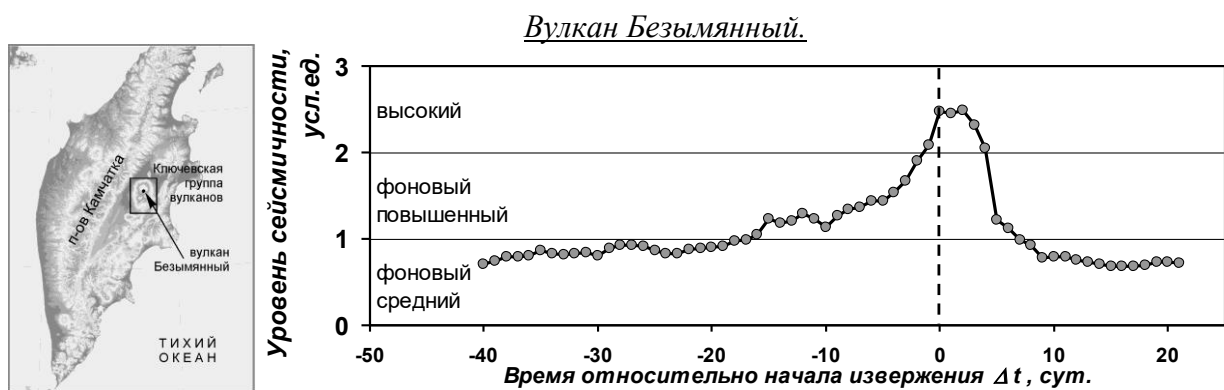


Рис. 7. Осредненное по 19 извержениям вулкана Безымянный 1999-2014 гг. поведение уровня сейсмичности во временной окрестности извержения ($\Delta t = 0$)

Разработана методика прогноза извержения вулкана Безымянный [4] на основе использования шкалы СОУС'09. Предвестник определен как превышение порогового значения функции, связанной с текущим значением уровня сейсмичности и его характерным видом перед извержением (рис. 7). Определен полный набор параметров, характеризующих предвестник: достоверность, надежность, эффективность, вероятность реализации прогноза. Создана номограмма вероятности в зависимости от длительности прогноза и значения прогностического параметра.

С 2017 г. методика применяется в рабочем режиме в КФ ЕГС РАН (рис. 8). На ее основе получены и переданы в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений предупреждения о семи извержениях 2017-2020 гг.

С октября 2017 г. в районе Удинской группы вулканов наблюдается сейсмическая активизация (рис. 9, 10). Ранее ничего подобного в этом районе не отмечалось.

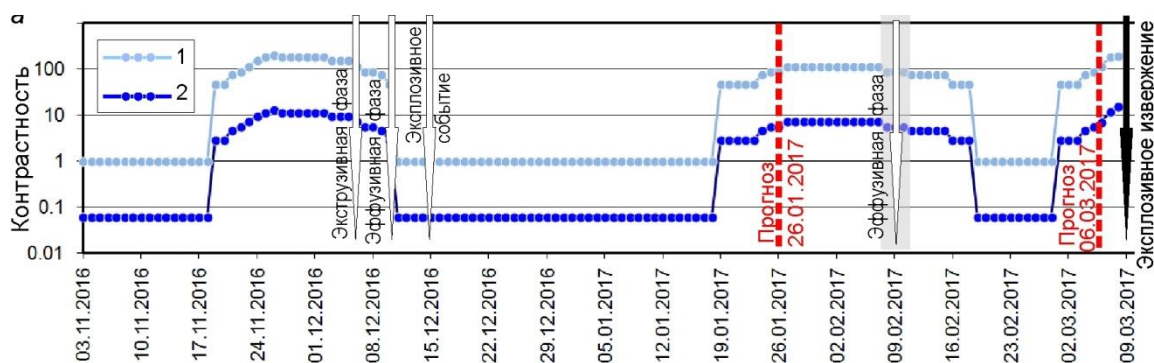


Рис. 8. Предвестниковые ситуации перед извержениями вулкана Безымянный в конце 2016 – начале 2017 гг.: отношение вероятности извержения вулкана при появлении предвестника к вероятности извержения в его отсутствие (1) и к среднемноголетней вероятности извержения (2).

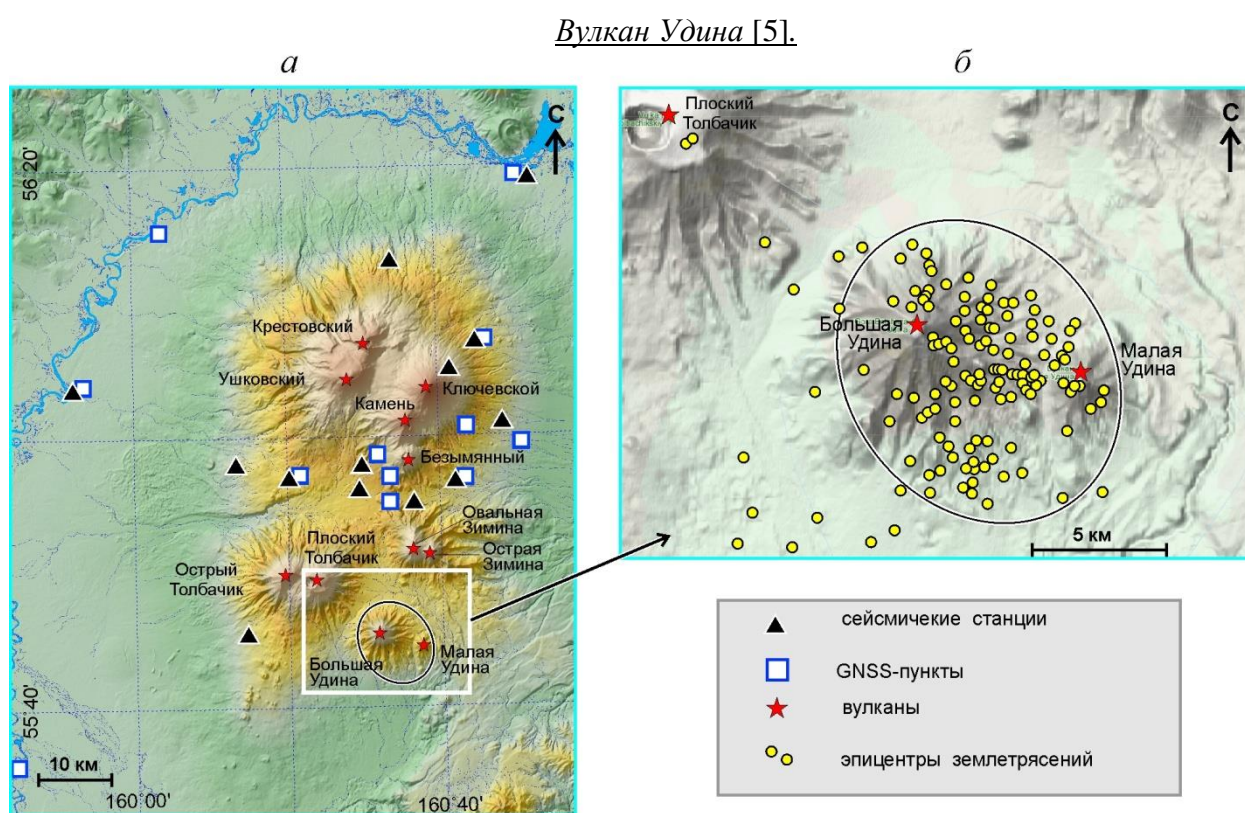


Рис. 9. Удинская сейсмическая активизация 2017–2018 гг. Сеть сейсмологических и геодеформационных наблюдений в районе Ключевской группы вулканов (а). Карта эпицентров землетрясений в районе Удинских вулканов с 01.10.2017 г. по 22.03.2018 г. (б)

В последние годы в мире повысился интерес к геоиндикатору volcanic unrest, который рассматривается как отклонение от обычного, фонового, поведения вулкана. Индикаторами volcanic unrest обычно выступают активизация сейсмичности, аномалии деформации земной коры, изменения газового состава фумарол, появление на вулканах новых термоаномалий и другие признаки. По данным исследования [6] 64% различных зафиксированных на вулканах аномалий, рассматриваемых как volcanic unrest, заканчиваются извержениями.

Извержение нельзя исключить и в нашем случае, так как длительная Удинская сейсмическая активизация свидетельствует о нарушении стационарного состояния среды, что может быть связано с внедрением магмы под Удинские вулканы.

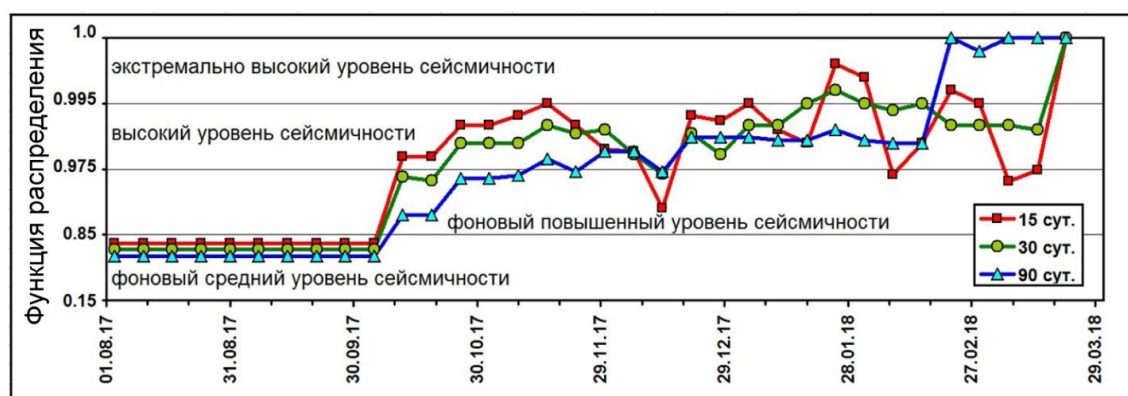


Рис. 10. Временной ход уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 в скользящем временном окне указанного размера. Расчеты проведены для области, околнуренной эллипсом на рис. 9

4. СОУС-карты различного масштаба.

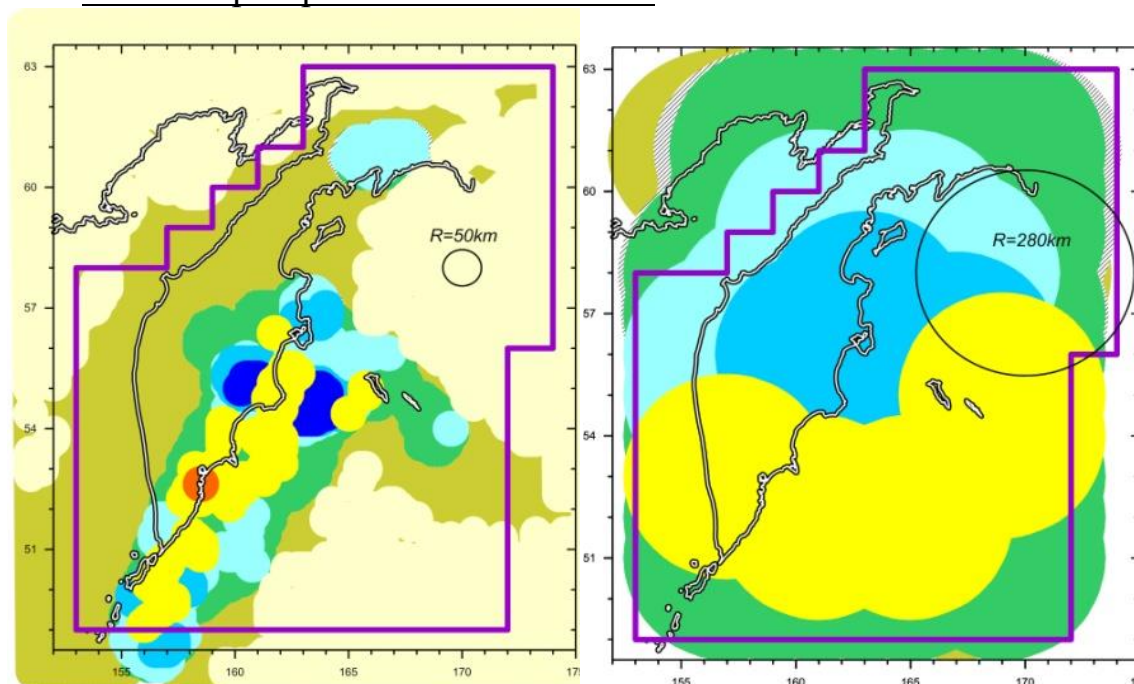


Рис. 11. Карты уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН при различной детальности построения. Сканирование проводилось кругами радиусом 50 и 280 км. Временной интервал – 28 суток. Состояние на 8 апреля 2021 г. Палитра – см. рис. 13

Сканирование пространства единичными кругами позволяет перейти от усредненной оценки к детальному представлению. Построение СОУС-карт заданного разрешения (рис. 11), определяемого радиусом единичного круга, позволяет оценивать уровень сейсмичности при различном пространственном масштабе ее вариаций, что дает возможность выявления как региональных, так

и локальных эффектов. Это актуально при мониторинге объектов с неоднородной структурой сейсмичности – например, полуостров Камчатка с прилегающими островами и акваторией. Также применяется при априори неизвестном объекте пристального внимания (зона затишья, зона активизации и т.д.), что позволяет локализовать аномалию.

5. Пространственное (поверхностное) сканирование сейсмоактивных объектов позволяет выявлять статистически значимые аномалии типа кратко-среднесрочного затишья.

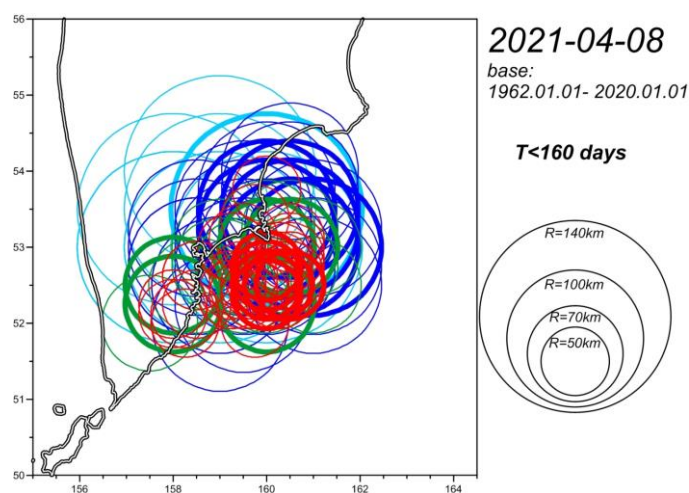


Рис. 12. Положение зон сейсмического затишья на юге Камчатки по состоянию на 8 апреля 2021 г. Продолжительность интервалов низкого (тонкие линии) или экстремально низкого (толстые линии) уровня сейсмичности от 7 до 160 сут.

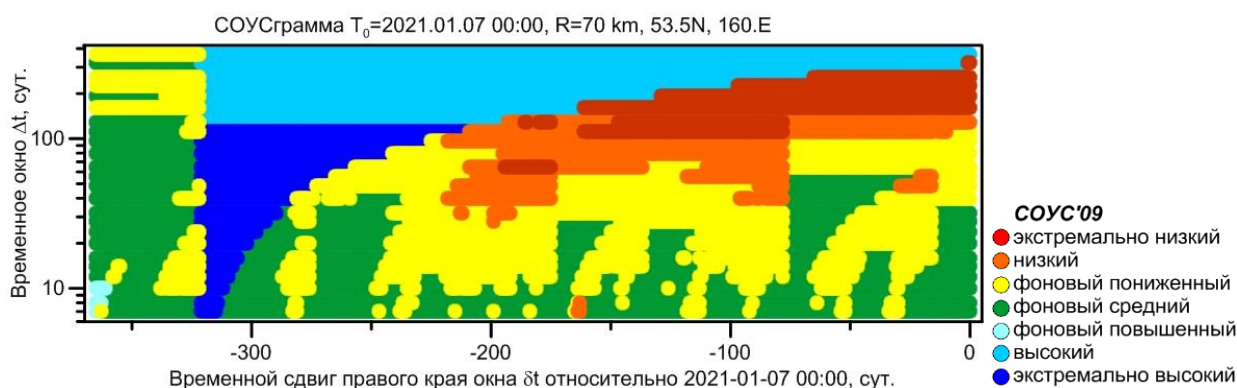


Рис. 13. СОУСграмма для единичной области радиусом 70 км с центром $53.5^{\circ}N$, $160.0^{\circ}E$

При выделении объекта (полигона, ячейки), представляющего интерес с какой-либо точки зрения, для него строится СОУСграмма, позволяющая анализировать развитие сейсмического процесса во времени. Как пример, на рис. 12 показаны зоны различного радиуса, в которых наблюдается экстремально низкий или низкий уровень сейсмичности в течении интервала времени от 7 до 160 сут., на юге Камчатки. Для одной из этих зон на рис. 13 представлено развитие этого затишья.

Заключение

Представлена методика «СОУС'09», позволяющая в качественных терминах определить уровень сейсмичности в заданной пространственно-временной области, основываясь на количественном параметре – значении функции распределения сейсмической энергии.

Предложена шкала оценки уровня сейсмичности: пять основных градаций и три дополнительных.

Показаны примеры применения этой методики.

Отмечены особенности использования данной методики и показаны отдельные ограничения ее применения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Разделы работы, касающиеся мониторинга состояния вулканов, выполнены при частичном финансировании Российским фондом фундаментальных исследований (грант РФФИ №19-05-00204).

Список литературы

1. ГОСТ Р 22.1.06-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов. Общие требования. М: Госстандарт России, 1999. 16 с.
2. Кугаенко Ю.А., Титков Н.Н., Салтыков В.А., Воропаев П.В. Анализ подготовки Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. в параметрах сейсмичности и деформаций земной коры по данным системы комплексного мониторинга активности вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 40-58.
3. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
4. Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. № 3. С.45–59.
5. Салтыков В.А., Воропаев П.В., Кугаенко Ю.А., Чебров Д.В. Удинская сейсмическая активизация 2017-2018 гг. // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 1. Вып. 37. С. 5-7.
6. Phillipson G., Sobradelo R., Gottsmann J. Global volcanic unrest in the 21st century: An analysis of the first decade // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 264. P. 183–196.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

¹А.В. Сахно, ^{1,2,3}С.А. Лебедев

a_v_sakhno@mail.ru; sergey_a_lebedev@mail.ru

¹*Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, г. Москва, г. Зеленоград*

²*Геофизический центр РАН, Россия, г. Москва*

³*Майкопский государственный технологический университет, Россия, г. Майкоп*

***Аннотация.** В работе были рассмотрены методы фильтрации зашумленных данных дистанционного зондирования. Затронуты прикладные аспекты цифровой модели рельефа, которые помогают в решении задач геологии и геофизики. С помощью численных экспериментов проведена оценка эффективности используемых методов.*

***Ключевые слова.** Рельеф, цифровая модель рельефа, миссия SRTM, интерполяция, twin experiment.*

Введение

Рельеф - один из основных факторов, которые определяют ход процессов, протекающих на поверхности планеты. Он влияет на перенос воды и других веществ вдоль поверхности земли. Рельеф вносит весомый вклад в создание особенностей климата внутри горных массивов, так как нарушает атмосферную циркуляцию и адвекцию воздушных масс, что влечет за собой изменения климата и погоды в прилегающих районах. В горной местности высота над уровнем моря, тип рельефа и крутизна склонов являются климатообразующими факторами. Цифровая модель рельефа (ЦМР) – это дискретная двумерная функция морфометрической характеристики, которая описывает топографическую поверхность в виде множества значений (матрицы) высот или глубин, измеренных или рассчитанных в узлах некоторой сетки. Также ЦМР включает в себя информацию о крутизне склонов (slope gradient), экспозиции склонов (slope aspect), горизонтальной кривизне (horizontal curvature), водосборной площади и др. [1]. Несомненно, получение качественной и количественной информации о рельефе является неотъемлемой частью решения прикладных задач в области геоэкологии, геологии и геофизики.

Объект исследования

Объектом исследования выбрана гора Бештау (от тюрк. беш - пять и тау - гора). Изолированная пятиглавая гора-лаколлит, высочайшая из 17 останцовых магматических гор Пятигорья на Кавказских Минеральных Водах. Памятник природы. Дала название окружающей местности (Пятигорье) и городу Пятигорску.

Относительно пологая (7–8°) нижняя часть горы рассечена радиальной системой глубоких балок. Начиная с высоты 820 м верхняя часть представляет

собой интенсивно расчленённый скальный массив площадью около 3 км². Главной вершиной является Большой Тау (1400 м), от неё радиально расходятся четыре основных отрога с вершинами: Малый Тау (1254 м), Козьи Скалы (1167 м), Два Брата (Лисий Нос) (1124 м), Лохматая (Лохматый Курган, Зелёный Мыс) (1080 м) (рис. 1) [3].

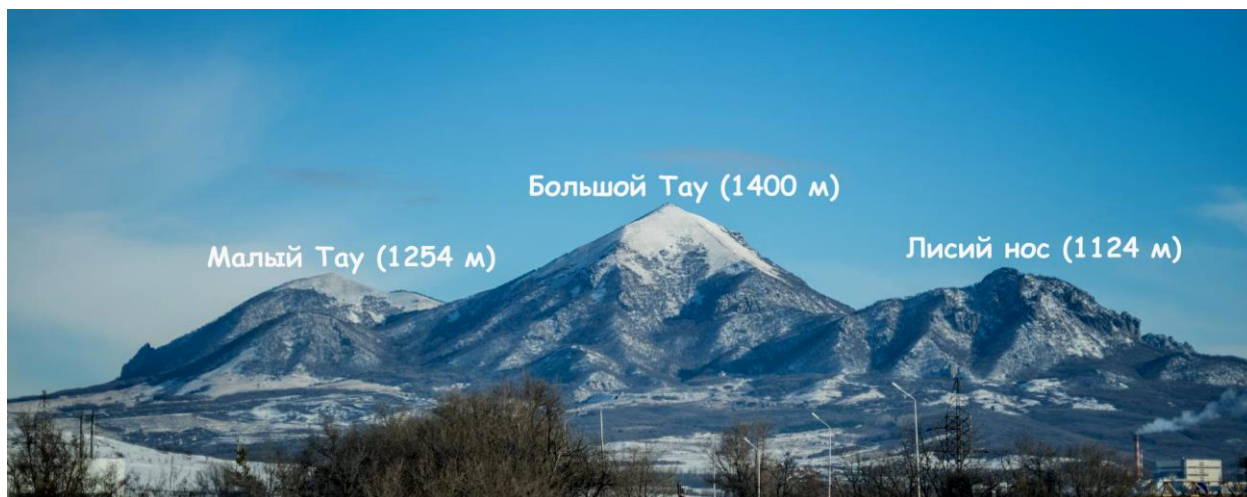


Рис. 1. Панорама г. Бештау

Исходные данные

В качестве исходных данных были выбраны данные радиолокационной интерферометрии спутниковых изображений радаров с синтезированной апертурной программы Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), доступные на портале Геологической службы США (United States Geological Survey – USGS). SRTM – международный проект по созданию цифровой модели рельефа суши с пространственным разрешением в 1 arc-second, что соответствует регулярной сетке с шагом 30 метров [4, 5]. Портал USGS предлагает данные в трех форматах: BIL, DTED и GeoTIFF. Для работы был выбран формат данных GeoTIFF, причём считывание матрицы высот из файла SRTM и обработка данных проводилась средствами пакета MATLAB.

Цифровая модель рельефа г. Бештау по данным SRTM без интерполяции представлена на рис. 2.

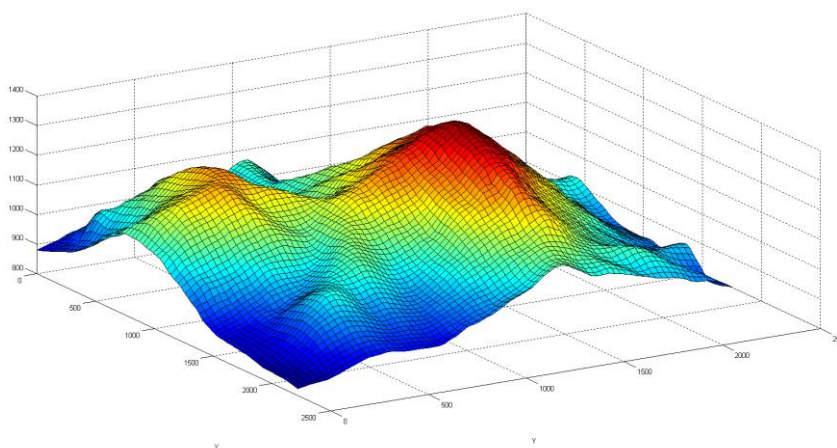


Рис. 2. Цифровая модель рельефа г. Бештау по данным SRTM

ЦМР, полученные с помощью дистанционного зондирования содержат случайные шумы, которые искажают форму поверхности склонов, оврагов, лощин. Данные SRTM имеют три версии:

– V1-SRTM Non-Void Filled – это исходные данные, полученные на основе необработанных радиолокационных сигналов. Данная версия требует определения береговой линии, а также обладает множеством пустот, которые появляются, когда вода или густая тень мешают количественному измерению высоты.

– V2- SRTM Void Filled – в этой версии пустоты частично заполнены и определена береговая линия.

– V3-SRTM 1 Arc-Second Global – окончательная версия, в которой с помощью алгоритмов интерполяции в сочетании с другими источниками данных о высотах все пустоты заполнены [6].

В нашем исследовании использовались данные SRTM-V3.

Метод исследования

В данной работе использовался метод идентичных близнецов (Twin experiment) [7]. Суть метода состоит в том, чтобы принять имеющиеся данные за эталон (рис. 2), а после этого добавить в эталон шум (рис. 3) и работать с уже зашумленными данными. После фильтрации можно определить, на сколько уменьшилась ошибка. Полученная разница будет критерием сравнения схем фильтрации. Данные SRTM-V3 будут считаться эталонными. Так как наиболее распространённый вид шума в радиолокации – это гауссовский белый шум, а также абсолютная погрешность высот в SRTM не превышает 16 метров, в исходные данные будем добавлять нормально распределённую ошибку $N(0, 16)$ [2, 8, 11,10].

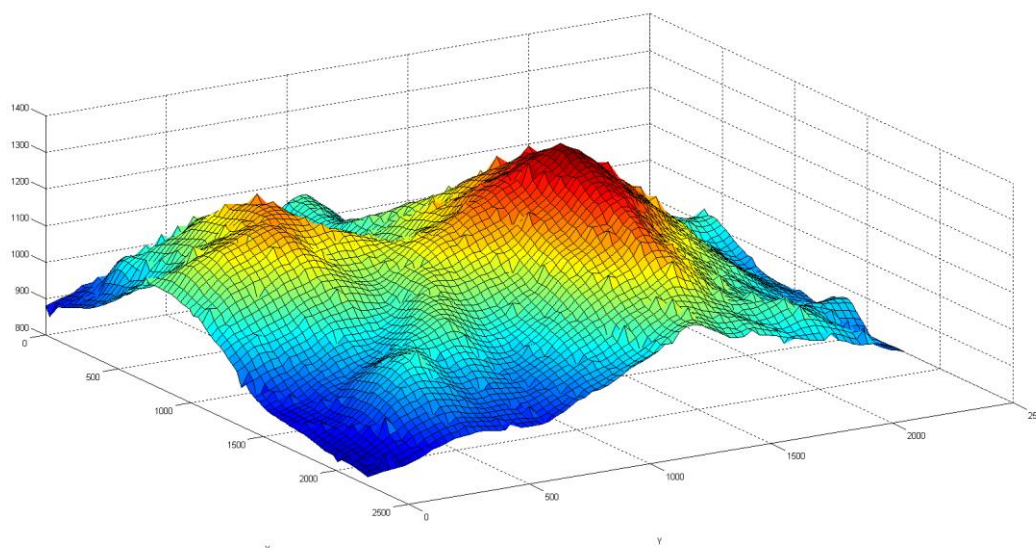


Рис. 3. Зашумленная цифровая модель рельефа г. Бештау

Для того, чтобы снизить влияние шумов будем использовать сглаживание интерполяцией. Рассмотрим две схемы.

Схема 3×3. Заполним матрицу $X_{N \times N}$ элементами из файла исходных данных и добавим к ней шум – нормально распределённую ошибку $N(0, 16)$. Из матрицы $X_{N \times N}$ будем выбирать подматрицы A_{ij} размера 3×3

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix},$$

где $i, j = 1, 2, \dots, N-2$, x_{ij} - верхний левый элемент подматрицы A_{ij} , после чего вычислим новое значение y_{ij} с помощью линейной интерполяции по всем элементам подматрицы A_{ij} .

$$y_{ij} = \frac{1}{2} \left(a_{22} + \frac{1}{4} \left\{ \frac{a_{11} + a_{33}}{2} + \frac{a_{31} + a_{13}}{2} + \frac{a_{21} + a_{23}}{2} + \frac{a_{12} + a_{32}}{2} \right\} \right)$$

Таким образом, после прохождения по всей исходной матрице $X_{N \times N}$ объединим новые значения в матрицу $Y = [y_{ij}]_{i,j=1}^{N-2}$, порядок которой будет на 2 меньше исходной [9].

Результаты интерполяции по данной схеме представлены на рис. 4.

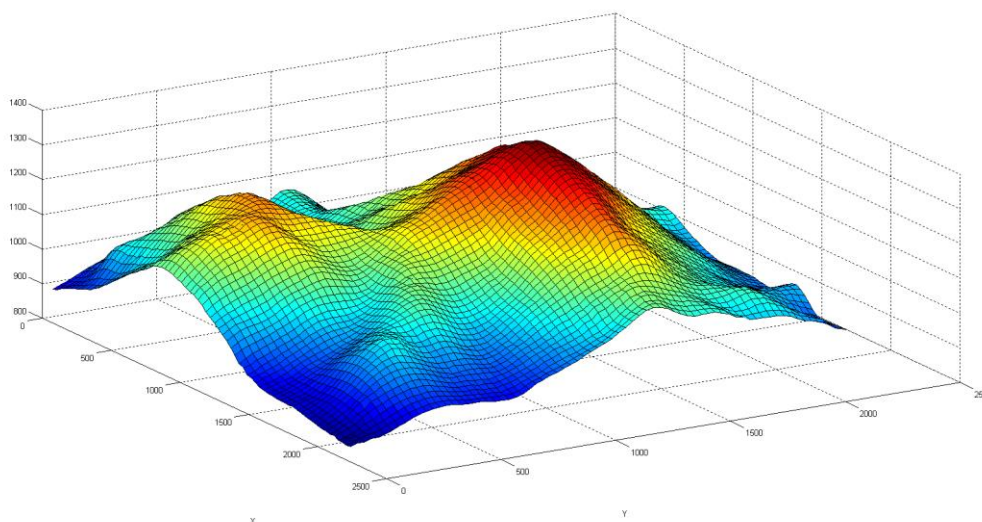


Рис. 4. Цифровая модель рельефа г. Бештау после интерполяции по схеме 3×3

Схема 5×5. Аналогично предыдущему пункту будем выбирать подматрицы A_{ij} размера 5×5,

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix},$$

где $i, j = 1, 2, \dots, N-4$, вычисляя y_{ij} посредством интерполирования по четырём точкам. Порядок полученной таким образом новой матрицы $Y = [y_{ij}]_{i,j=1}^{N-4}$ будет на 4 меньше исходного [9].

$$y_{ij} = \frac{1}{2} \left(a_{33} + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 b_i \right),$$

где $b_1 = f(a_{11}, a_{22}, a_{44}, a_{55})$, $b_2 = f(a_{31}, a_{32}, a_{34}, a_{35})$, $b_3 = f(a_{51}, a_{42}, a_{24}, a_{15})$, $b_4 = f(a_{13}, a_{23}, a_{43}, a_{53})$; $f(y_{i-2}, y_{i-1}, y_{i+1}, y_{i+2}) = y_i$ – значение в центре интервала интерполяции.

Результаты интерполяции по данной схеме представлены на рис. 5.

Сглаживание по второй схеме занимает больше машинного времени, по сравнению с первой.

Сравнивать результаты работы обеих схем будем с помощью методов статистики: выборочного среднего $m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ и среднеквадратичного

отклонения $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$.

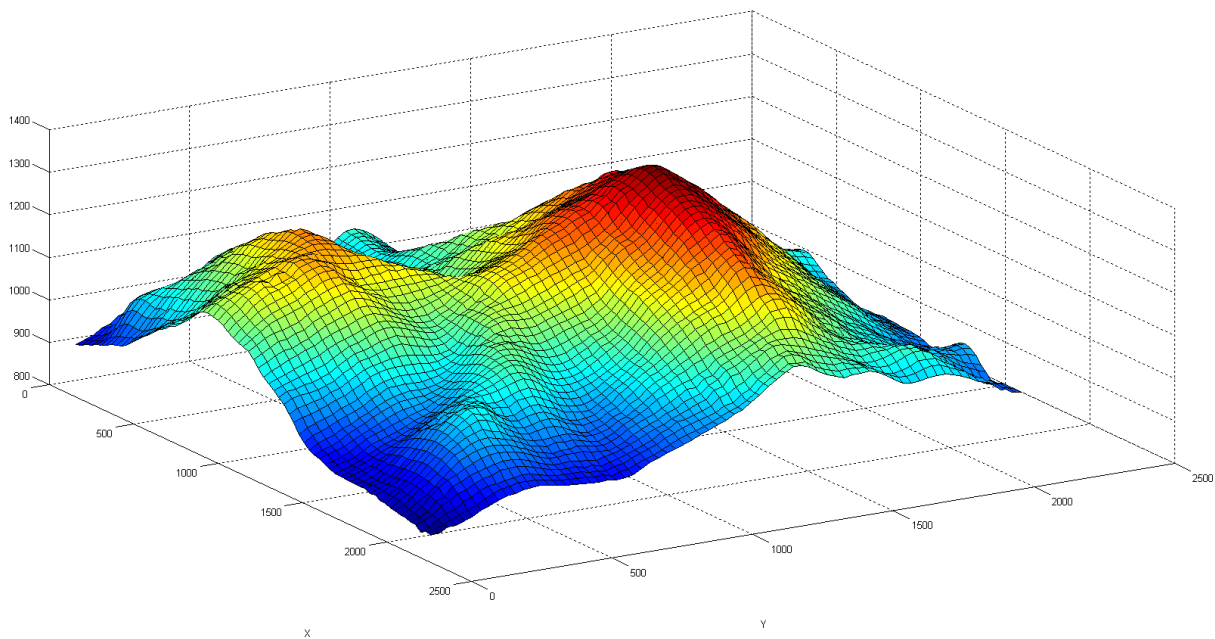


Рис. 5. Цифровая модель рельефа г. Бештау после интерполяции по схеме 5×5

Обе схемы были реализованы с помощью пакета MATLAB. В качестве исходных данных для сравнения точности обеих схем интерполяции были взяты две главные вершины г. Бештау – Большой Тау и Малый Тау.

Результаты семи экспериментов приведены ниже (табл. 1), они позволяют заметить тенденцию увеличения точности от простого метода к сложному.

Среднее значение погрешности первой схемы $m_{3 \times 3}$ в 1.08 раз больше среднего значения погрешности второй схемы $m_{5 \times 5}$, как и ожидалось, вторая схема точнее. Однако, среднеквадратическое отклонение второй схемы $\sigma_{5 \times 5}$

превосходит среднеквадратическое отклонение первой схемы $\sigma_{3 \times 3}$ в 1.2 раза, значит разброс искусственно введённой ошибки во второй схеме сильнее распространился на соседние элементы узла с погрешностью. Как и следовало ожидать, схема, которая интерполирует по 25 элементам чаще встречает один и тот же узел с погрешностью, учитывая его, нежели схема, которая использует 9 узлов, отсюда мы получаем увеличенный разброс второй схемы. Матрицу с общим числом элементов 5625 первая схема проходит за 0.5 секунды, вторая за 13 секунд.

Таблица 1

Результаты расчетов

Номер эксперимента	$m_{3 \times 3}$ (м)	$m_{5 \times 5}$ (м)	$\sigma_{3 \times 3}$ (м)	$\sigma_{5 \times 5}$ (м)
1	2,1405	1,9704	0,2682	0,3572
2	2,1332	1,9317	0,2501	0,2852
3	2,1325	2,0288	0,2821	0,3625
4	2,1920	2,0329	0,2958	0,3447
5	2,1513	1,9899	0,3076	0,3010
6	2,1472	2,0184	0,2597	0,3117
7	2,1533	2,0097	0,2561	0,3236
Средние значения	2,15	1,9974	0,2742	0,3266

Заключение

В работе были рассмотрены методы интерполяции зашумленных данных дистанционного зондирования SRTM. Приведены сведения о различных версиях ЦМР SRTM и их особенностях. Для иллюстрации результатов теоретических исследований был реализован эксперимент идентичных близнецов (Twin experiment). По проведенным численным экспериментам можно сделать следующие выводы: схема 3×3 уступает в точности схеме 5×5 , но является простой в реализации и обладает меньшим разбросом, по сравнению со второй схемой. Кроме того, обе схемы хорошо справляются с шумом, снижая абсолютную погрешность данных с 16 до 2.15 метров.

Автор выражает искреннюю благодарность С.А. Лебедеву, В.П. Шутяеву, Н.Б. Захаровой, Т.О. Шелопут, Н.Р. Лёзиной за обсуждение работы, ценные советы и замечания.

Список литературы

1. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Kravchenko P.N. Digital Elevation Model of the Republic of Adygea. //The Handbook of Environmental Chemistry /Eds. S.A. Lebedev, M.K. Bedanokov, A.G. Kostianoy. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2020. – P. 57-83. doi: 10.1007/698_2020_656
2. Возенкрафт Дж., Джекобс И. Теоретические основы техники связи. М.: Мир, 1969. — 640 с.
3. Бештау [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Бештау>
4. Shuttle Radar Topography Mission [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Shuttle_Radar_Topography_Mission

5. EarthExplorer [Электронный ресурс]: USGS. – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
6. USGS EROS Archive [Электронный ресурс]: SRTM Data Products. – Режим доступа: <https://doi.org/10.5066/F7K072R7>
7. RMETS [Электронный ресурс]: Twin experiments with the equivalent weights particle filter and HadCM3. – Режим доступа: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/qj.2621>
8. Оньков И.В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика, 2011, №3. - С. 1-6.
9. Ярошевич В.А. Численные методы. Лекции, практические занятия, лабораторный практикум. – М.: МИЭТ, 2021. С. 33-37.
10. Трофимов А.А., Филиппова А.В. Оценка точности матрицы высот SRTM по материалам топографических съемок. // Геопрофи. – 2014. – №6. – С. 13-16
11. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of The SRTM Topographic Product // Technical Report JPL D-31639, Pasadena Jet, California: Propulsion Laboratory, 2005. – 143 pp.

ПРОЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА В ЗИМНИЙ И ЛЕТНИЙ ПЕРИОД ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

^{1,2}Е.И. Свергун, ^{1,2}А.В. Зимин, ²Е.С. Лазуткина

egor-svergun@yandex.ru

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, [Россия](#), г. Москва*

²*Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, г. Санкт-Петербург*

Введение

Рельеф дна Курило-Камчатского региона представлен материковым склоном, узким шельфом и различными по морфометрии проливами между Курильскими островами. Взаимодействие внутреннего прилива распространяющегося со стороны Тихого океана с крутым материковым склоном должно приводить в Курило-Камчатском регионе к возникновению очагов генерации короткопериодных внутренних волн (КВВ), аналогично другим районам Мирового океана со схожими физико-географическими условиями [1]. Согласно данным спутниковых наблюдений [2, 3, 4] на акватории региона регистрируются многочисленные поверхностные проявления КВВ. В работе [5] на основе анализа спутниковых наблюдений за летний период 2019 года были впервые получены детальные характеристики поля поверхностных проявлений КВВ и продемонстрирована их высокая встречаемость на всей исследуемой акватории. Это обусловило мотивацию к проведению дальнейших исследований по изучению внутригодовой изменчивости характеристик проявлений КВВ. В данной работе будут впервые продемонстрированы характеристики проявлений КВВ Курило-Камчатского региона по данным спутниковых наблюдений в зимний период 2018-2019 годов, будет рассмотрена пространственно-временная изменчивость характеристик проявлений в летний и зимний сезон, а также будут рассмотрены некоторые возможные причины такой изменчивости.

Описание исследуемого региона, исходных данных и методов их обработки

Рельеф дна рассматриваемой акватории показан на рис. 1. Юго-восточнее островов Онекотан и Парамушир расположен подводный хребет Витязь, глубиной от 60 до 200 метров. Далее расположен Курило-Камчатский желоб с глубиной более 6000 метров.

Приливной поток, распространяющийся из открытой части Тихого океана взаимодействует с описанными неровностями дна, что приводит к генерации внутреннего волнения.

Для регистрации поверхностных проявлений КВВ были использованы радиолокационные изображения (РЛИ) с аппаратов Sentinel-1A и B в S-диапазоне с VV-поляризацией и режимом съемки IW с разрешением 20 метров и шириной полосы обзора 250 километров. Всего было использовано 205 РЛИ, охватывающих летний период, а также 204 РЛИ за зимний период. Карта покрытия акватории Курило-Камчатского региона в летний период представлена на рис. 2а, в зимний период – на рис. 2б.

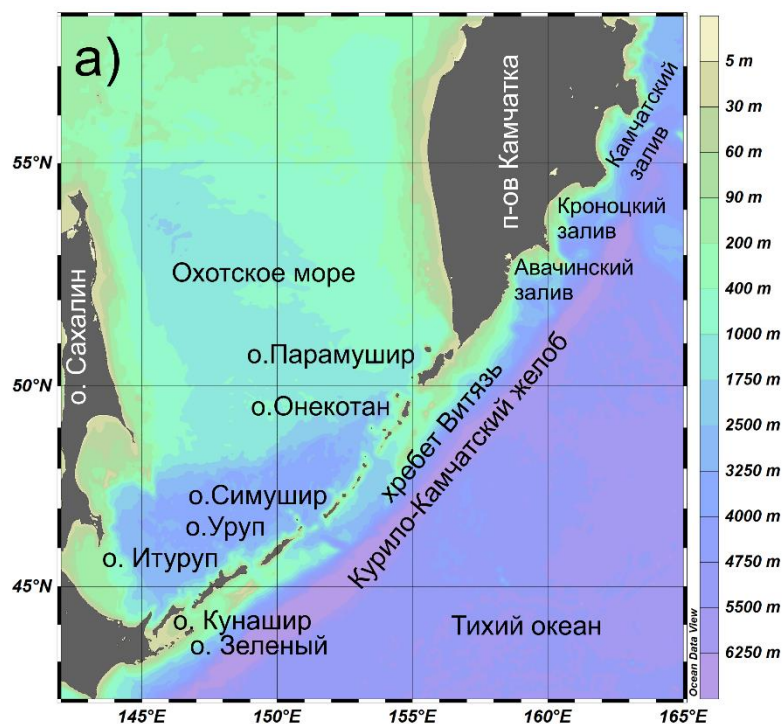


Рис. 1. Карта рельефа дна Курило-Камчатского региона

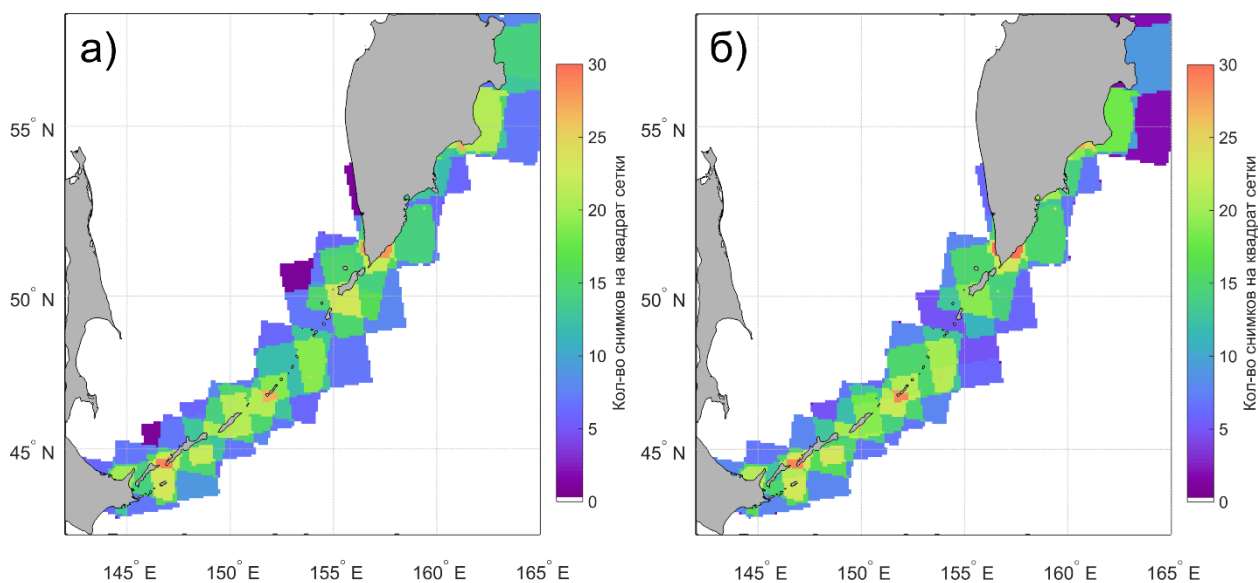


Рис. 2. Покрытие исследуемой акватории РЛИ: а) – в летний период; б) – в зимний период

Внутренние волны на РЛИ морской поверхности проявляются в виде дугообразных чередующихся светлых и темных полос, образующих волновые пакеты. Это явление обусловлено Брэгговским рассеянием радиолокационного сигнала на капиллярных поверхностных волнах, которые генерируются течением, возникающим при прохождении КВВ [6]. Для поверхностных проявлений КВВ определялись: положение проявления, длина волны, длина дуги лидирующего гребня в пакете направление распространения, количество волн в пакете. Лидирующие гребни пакетов проявлений КВВ наносились на карты для анализа их пространственного распределения по исследуемой акватории. Рассчитывались гистограммы повторяемости дат регистрации проявлений КВВ.

Согласно [18], существенное влияние на отображение проявлений КВВ на РЛИ оказывает скорость приводного ветра и глубина перемешанного слоя. Для выявления причин пространственно-временной изменчивости проявлений КВВ привлекались среднемесячные поля скорости ветра над исследуемым регионом, а также среднемесячная глубина перемешанного слоя в Камчатском заливе. Данные выбирались на портале COPERNICUS (<https://resources.marine.copernicus.eu/>).

Результаты работы

На 205 проанализированных РЛИ за летний период 2019 года было зарегистрировано 927 проявлений пакетов КВВ. Минимальное число проявлений было зарегистрировано в первой половине июня, а максимальное – в первой половине июля. Проявления содержали 3 до 18 волн в пакете. Длины волн внутри пакета варьировали от 80 до 1900 метров, при среднем значении в 400 метров. Фронт лидирующего гребня цуга волн имел размеры от 2 до 70 км, составляя в среднем 14 км. Наибольшее число волн было зарегистрировано у островов Кунашир и Зеленый, в Камчатском заливе, южнее островов Онекотан и Матуа над подводным хребтом Витязь.

На 204 РЛИ за зимний период 2018-2019 годов было зарегистрировано 47 проявлений КВВ, состоящих из 3 – 10 волн в пакете, с длиной лидирующего гребня от 5 до 40 км и длиной волны от 200 до 1000 метров. Максимальное число проявлений регистрируется в декабре, а минимальное – в феврале. Наибольшее количество волн в зимний период регистрируется в Камчатском заливе. На рис. 3а показано пространственное распределение лидирующих гребней проявлений КВВ, зарегистрированных в зимний период, на рис. 3б – в летний период. Таким образом, проявления КВВ, зарегистрированные в зимний период имеют меньшие геометрические размеры, чем в летний период. Для июля и февраля, месяцев с минимальным и максимальным количеством зарегистрированных проявлений, были проанализированы среднемесячные поля скорости ветра по данным реанализа COPERNICUS, представленные на рис. 3в и 3г.

Из рис. 3в и 3г видно, что в феврале над исследуемой акваторией преобладает ветер со скоростями от 8 до 14 м/с, а в июле скорость ветра не превышает 7 м/с. Согласно [6], при увеличении скорости приводного ветра уменьшается вероятность отображения КВВ на морской поверхности. Повидимому, одной из причин малого числа зарегистрированных в зимний период проявлений КВВ служит относительно высокая скорость приводного ветра.

Для анализа возможных причин временной изменчивости числа зарегистрированных проявлений была проанализирована временная изменчивость среднемесячной глубины перемешанного слоя в одном из районов максимальной встречаемости проявлений внутренних волн в Камчатском заливе в точке с координатами 155.15° в.д., 49.67° с.ш. На рис. 4 представлена гистограмма повторяемости дат регистрации проявлений КВВ, совмещенная с временным ходом среднемесячной глубины перемешанного слоя.

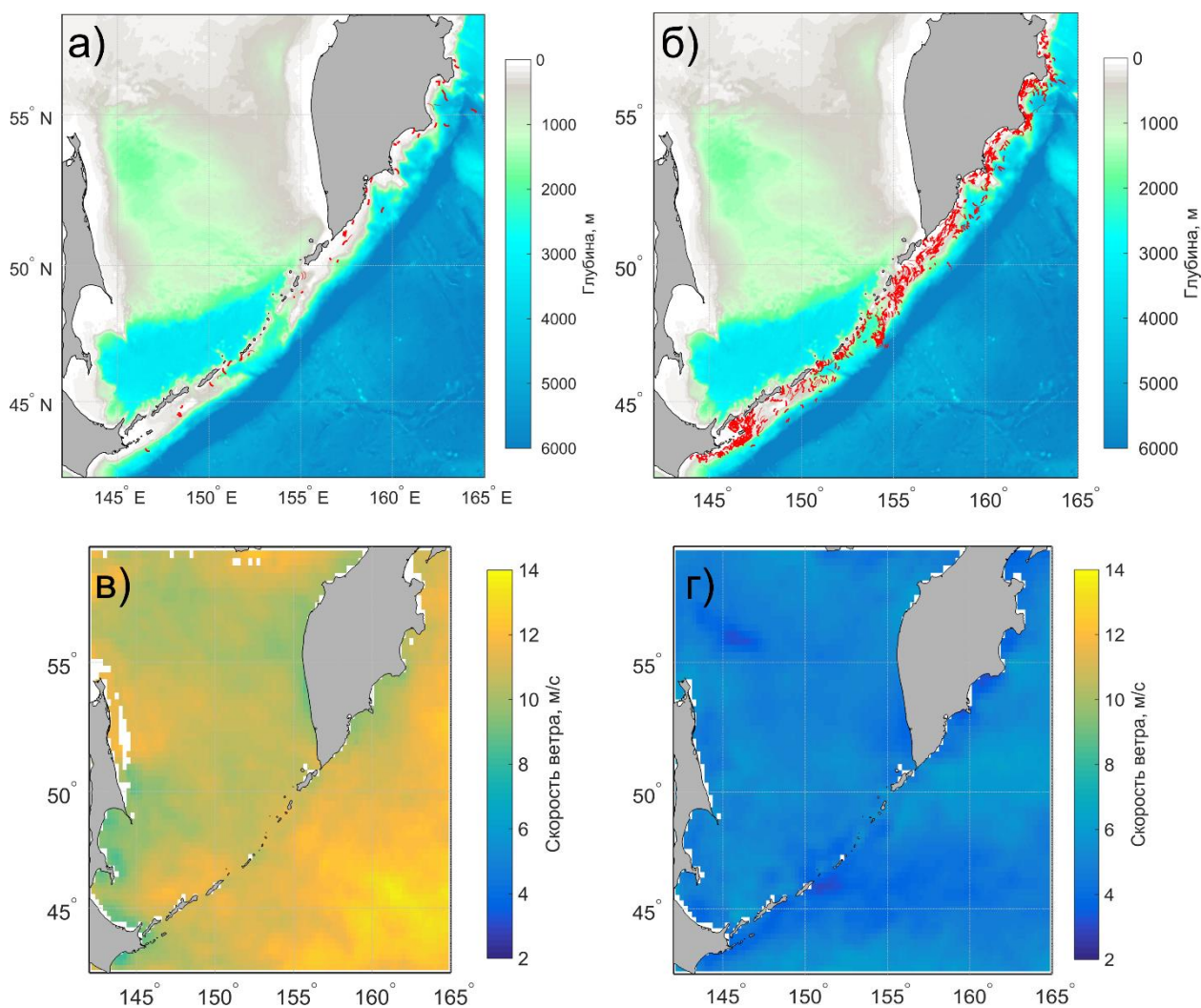


Рис. 3. Пространственное положение лидирующих гребней проявлений КВВ и среднемесячные поля скорости ветра: а) положение лидирующих гребней проявлений КВВ в зимний период; б) положение лидирующих гребней проявлений КВВ в летний период; в) среднемесячное поле скорости ветра в феврале 2019 года; г) среднемесячное поле скорости ветра в июле 2019 года

Рис. 4 демонстрирует ярко выраженную обратную связь между числом зарегистрированных проявлений КВВ и глубиной перемешанного слоя. В летний период, когда значения глубины перемешанного слоя минимальны и составляют около 10 м, в Камчатском заливе регистрируется максимальное число проявлений, а в зимний сезон, с увеличением глубины перемешанного слоя до 90 – 130 м наблюдается уменьшение числа проявлений. В дальнейшем будут получены характеристики повторяемости дат регистрации проявлений в весенний и осенний сезоны, что позволит более детально изучить зависимость числа регистрируемых проявлений от глубины перемешанного слоя.

Заключение

В результате работы получены детальные карты, описывающие распространение КВВ на акватории Тихоокеанского побережья России в зимние и летние месяцы. Продемонстрировано значительное различие в количестве регистрируемых на акватории Курило-Камчатского региона

проявлений КВВ в теплый и холодный сезоны. Установлено, что в зимний период проявления КВВ имеют меньшие размеры, чем в летний. Зарегистрированные различия объясняются, особенностями годового хода стратификации и влиянием атмосферных процессов на возможности регистрации проявлений волн.

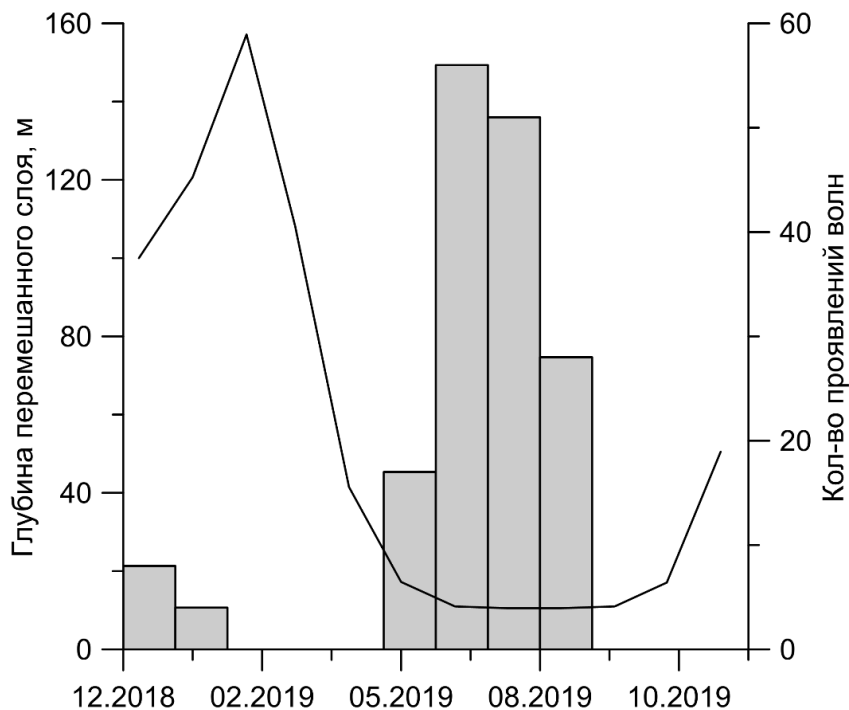


Рис. 4. Гистограмма повторяемости дат регистрации проявлений КВВ в Камчатском заливе с нанесенным на нее временным ходом глубины перемешанного слоя в точке с координатами 155.15° в.д., 49.67° с.ш.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ №20-35-90054 Аспиранты.

Список литературы

1. Сабинин К.Д. Серебряный А.Н. Горячие точки в поле внутренних волн в океане // Акустический журнал. 2007. Т.53, №3. С.410-436.
2. Jackson C. R. An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties. Alexandria: Global Ocean Associates, 2004. 560 p. URL: https://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html (дата обращения: 09.10.2020).
3. Дикинис А.В. и др. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом "Алмаз-1" / под ред. Л.Н. Карлина. М.: ГЕОС, 1999. 119 с.
4. Mitnik L, Dubina V. Satellite SAR sensing of oceanic dynamics in the Kuril straits area // Proc IGARSS 2012 Munich, Germany, 2012. P. 7632 – 7635.
5. Свергун Е.И., Зимин А.В., Лазуткина Е.С. Характеристики проявлений короткопериодных внутренних волн Курило-Камчатского региона по данным спутниковых наблюдений в летний период // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 1. С. 106–115.
6. Robinson I. S. Discovering the Ocean from Space: The unique applications of satellite oceanography. London: Springer, 2010. 638 p.

О МЕЖДЕКАДНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА У ПОВЕРХНОСТИ В РЕГИОНЕ БЕЛОГО МОРЯ

^{1,2}И.В. Серых, ^{1,2,3}А.Г. Костяной, ^{2,4}С.А. Лебедев, ^{1,2}Е.А. Костяная
iserykh@gmail.com; kostianoy@gmail.com; sergey_a_lebedev@mail.ru;
janekost@mail.ru

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, г. Москва

²Геофизический центр РАН, Россия, г. Москва

³Московский университет им. С.Ю. Витте, Россия, г. Москва

⁴Национальный исследовательский университет «Московский институт
электронной техники», Россия, г. Москва, г. Зеленоград

Аннотация. Исследованы изменения температуры воздуха у поверхности (ТВП) акватории Белого моря и территории Мурманской и Архангельской областей и Республики Карелия. Анализировались среднемесячные данные реанализа NCEP/NCAR за период 1950-2020 гг. Оцененный с помощью линейного тренда средний рост ТВП составил $+0.24^{\circ}\text{C} / 10$ лет. На фоне этого линейного роста наблюдаются существенные междекадные изменения ТВП. Выделены периоды: усиления континентальности климата (1950-1976 гг.), более морского климата (1977-1998 гг.), и быстрого роста ТВП (1999-2020 гг.). Переход от периода усиления континентальности климата к периоду более морского климата связан с усилением влияния Северной Атлантики на исследуемый регион. Выдвинута гипотеза, что период быстрого роста ТВП вызван произошедшим переходом климатической системы западной части Российской Арктики в новое фазовое состояние.

Введение

Субарктическая зона России особенно уязвима к изменению климата, поскольку в зоне вечной мерзлоты расположена инфраструктура на сотни миллиардов долларов. В то же время, по данным наблюдений с середины 1970-х годов средние температуры здесь растут в 2.5 раза быстрее, чем в целом по планете. Если произойдет оттаивание мерзлых толщ, то из-за значительного содержания в них льда, средняя осадка грунтов может составлять 10 метров и более. Железнодорожная инфраструктура в субарктических регионах эксплуатируется в чрезвычайно сложных инженерно-геологических и ландшафтно-климатических условиях, подвергаясь непрерывному воздействию различных внешних воздействий, приводящих к деформациям пути и искусственных сооружений [Kostianaia et al., 2021]. Среди них: береговая абразия, селевые потоки, паводки, эрозия, оползни и сплывы, обвалы и осыпи, карстовые провалы, суффозионные просадки, наледи, термокарст, термоэрозия и солифлюкция, разрывные деформации, морозное пучение, снежные лавины и пр.

Островковые зоны вечной мерзлоты находятся на Кольском полуострове. 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-му, как планировали ранее.

В связи с этим, исследования изменений климата рассматриваемого региона чрезвычайно важны для Российских железных дорог (РЖД). Данное исследование является продолжением работ, начатых в [Serykh and Kostianou, 2019; Серых и Костяной, 2019; Серых и Толстиков, 2020].

Данные и методика

Анализировались среднемесячные данные температуры воздуха у поверхности (ТВП) – на уровне сигма 0.995. На этом уровне атмосферное давление в данной ячейке сетки на данном временном шаге в 0.995 раз превышает атмосферное давление у поверхности в этой ячейке сетки в это время. Этот уровень приблизительно соответствует высоте 42.2 метра над поверхностью. Данные взяты из NCEP/NCAR Reanalysis на сетке $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ за период 1950-2020 гг. [Kalnay et al., 1996].

В каждом узле сетки рассчитан средний за рассматриваемый период годовой ход ТВП. Полученный отдельно для каждого узла сетки средний годовой ход вычитался из исходных данных ТВП для получения аномалий ТВП в каждом узле сетки относительно среднего годового хода (далее просто аномалий). Линейные тренды вычислялись с помощью метода наименьших квадратов.

Производилось осреднение аномалий ТВП для расширенного региона Белого моря (61.25° - 71.25° с.ш.; 28.75° - 46.25° в.д.). Координаты указаны с учетом сетки NCEP/NCAR Reanalysis, поскольку каждый узел сетки содержит данные осредненные для своей окрестности $\pm 1.25^{\circ}$. В исследуемый регион попадают узлы сетки с широтами 62.5° , 65° , 67.5° , 70° с.ш. и долготами 30° , 32.5° , 35° , 37.5° , 40° , 42.5° , 45° в.д. Таким образом, исследуемый регион включает в себя всю акваторию Белого моря, часть юга Баренцева моря, всю территорию Мурманской области и республики Карелия и большую часть Архангельской области.

Результаты

На рис. 1 (зеленая линия) представлен временной ряд изменений средней ТВП в исследуемом регионе. Изменчивость среднемесячной ТВП составляет $\sim 35^{\circ}\text{C}$: от -18°C до $+17^{\circ}\text{C}$. При этом изменчивость локальных минимумов ТВП составляет $\sim 13^{\circ}\text{C}$: от -18°C до -5°C , что сильнее изменчивости локальных максимумов ТВП $\sim 6^{\circ}\text{C}$: от $+11^{\circ}\text{C}$ до $+17^{\circ}\text{C}$.

В рассматриваемый временной период имело место глобальное потепление климата, вызванное, по всей видимости, главным образом антропогенным воздействием. Коль скоро это принимается, то влияние глобального потепления на рассматриваемый регион можно, с некоторым допущением, аппроксимировать линейным трендом, поскольку рост

содержания парниковых газов в атмосфере за этот период также хорошо приближается полиномом 1-ой степени. При этом следует помнить, что как глобальная, так и региональная климатические системы являются нелинейными, поэтому и их отклики на антропогенное воздействие также на самом деле будут нелинейными. Но в настоящее время надежно и точно отделить нелинейный отклик климатической системы на антропогенный форсинг от её нелинейных откликов на другие внешние воздействия (например, на изменения солнечной активности) и от собственных колебаний системы (моды климатической изменчивости), на наш взгляд, не представляется возможным.

Линейная аппроксимация временного ряда изменений средней ТВП региона Белого моря демонстрирует её рост в среднем на $+0.24^{\circ}\text{C}$ за 10 лет (фиолетовая линия на рис. 1). Таким образом, за рассматриваемый 71 год рост ТВП составил приблизительно $+1.7^{\circ}\text{C}$. С учетом описанного выше допущения, этот линейный рост можно связать с влиянием антропогенного глобального потепления на исследуемый регион. Однако следует также принять во внимание, что примененный для оценки линейного тренда метод наименьших квадратов очень чувствителен к краевым значениям. А на краевые значения, в свою очередь, влияет межгодовая и межсезонная изменчивость исследуемого ряда.

Межгодовая (рис. 1, черная кривая линия) и межсезонная (рис. 1, красные и синие круги) изменчивость средних аномалий ТВП в рассматриваемом регионе демонстрирует большой диапазон значений, как между отдельными годами, так и отдельными сезонами. При этом изменчивость аномалий ТВП между гидрологическими зимними периодами (январь-март) сильнее (до 13°C), чем между гидрологическими летними периодами (июль-сентябрь) (до 6°C).

На рис. 2 представлена изменчивость средних аномалий ТВП исследуемого региона после применения низкочастотных фильтров для выделения более продолжительных изменений. На временных рядах рис. 2 на фоне линейного роста аномалий ТВП можно выделить три периода с отличающимися характеристиками. Первый период 1950-1976 гг. характеризуется сильными положительными аномалиями ТВП в теплые полугодия (май-октябрь). Во второй период 1977-1998 гг. ситуация изменилась и сильные положительные аномалии ТВП стали наблюдаться в основном в холодные полугодия, а в теплые полугодия стали наблюдаться в основном отрицательные аномалии. Третий период 1999-2020 гг. характеризуется резким ростом положительных аномалий ТВП как в холодный (до $+3^{\circ}\text{C}$), так и в теплый период года (до $+2^{\circ}\text{C}$).

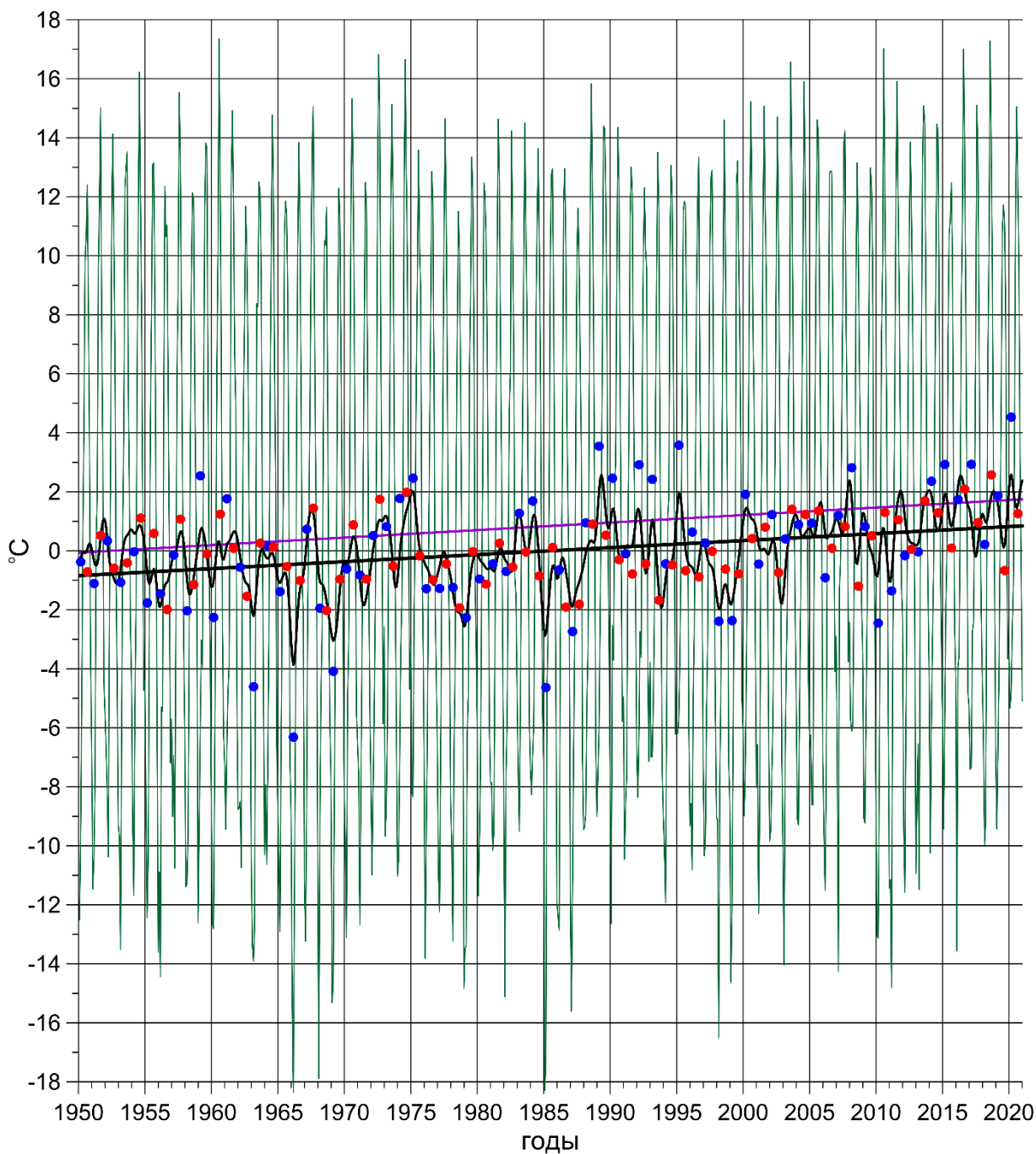


Рис. 1. Изменения средней температуры воздуха у поверхности (ТВП) в регионе Белого моря (зеленый), и линейное приближение этого временного ряда (фиолетовый) за 1950-2020 гг. Изменения средних аномалий ТВП в регионе Белого моря, сглаженные 1-летним фильтром Баттерворта нижних частот (черный), и их линейный тренд (черная прямая линия). Кругами отмечены средние значения аномалий ТВП для гидрологического лета (июль-сентябрь) (красный) и зимы (январь-март) (синий).

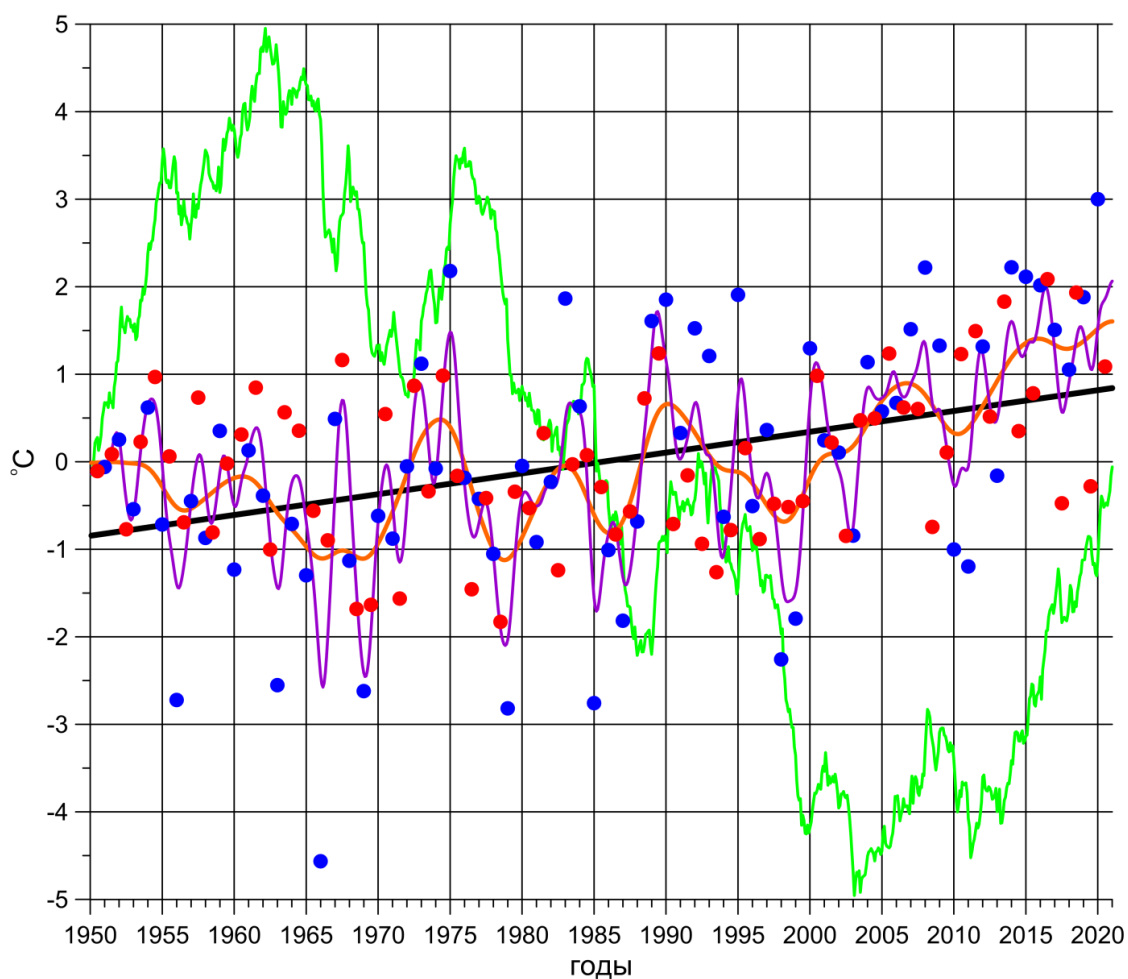


Рис. 2. Изменения средних аномалий температуры воздуха у поверхности (ТВП) в регионе Белого моря за 1950-2020 гг., сглаженные 2-летним (фиолетовый) и 7-летним (оранжевый) фильтрами Баттерворта нижних частот. Их линейный тренд (черный) и накопленная сумма аномалий после удаления линейного тренда (зеленый). Кругами отмечены средние значения аномалий для теплого (май-октябрь) (красный) и холодного (ноябрь-апрель) (синий) полугодий.

На рис. 3 представлены поля средних ТВП за весь рассматриваемый период (рис. 3а) и за выделенные три периода (рис. 3б-г). Обращает на себя внимание то, что в первые два периода (1950-1976 и 1977-1998 гг.) средние ТВП мало отличались, но в третий период (1999-2020 гг.) произошел существенный сдвиг средних ТВП по сравнению с двумя предыдущими периодами. В первые два периода на юго-западе Кольского полуострова в регионе (66.5° - 68.5° с.ш.; 30° - 34° в.д.) и на востоке Архангельской области (64° - 67° с.ш.; 43° - 45° в.д.) средние ТВП были немного ниже нуля (рис. 3б-в), из-за чего там существовала вечная мерзлота. В третий период средние ТВП стали выше нуля во всей области исследования (рис. 3г), из-за чего следует ожидать таяния вечной мерзлоты в этих регионах. Интересной особенностью произошедших изменений является тот факт, что продвижение тепла с юга на север (например, изотерма 2°C на долготе 38° в.д. поднялась с 60° с.ш. практически до 65° с.ш.) привело не к смещению холодных областей к северу, а к их выжиманию на запад и восток, соответственно. Кроме того, на градус потеплела атмосфера и над Баренцевым морем (рис. 3г).

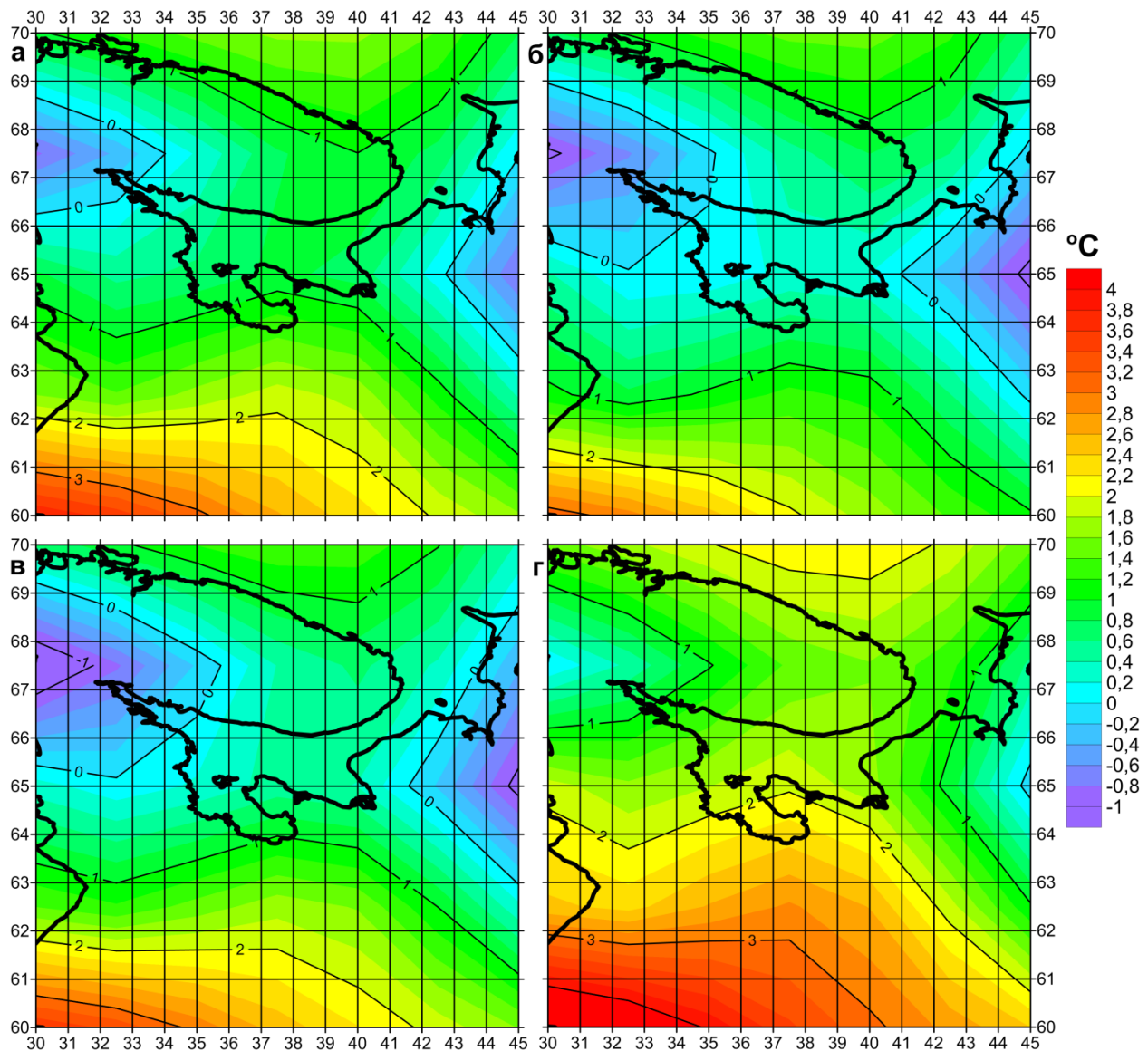


Рис. 3. Поля средних температур воздуха у поверхности (ТВП) за периоды: 1950-2020 гг. (а), 1950-1976 гг. (б), 1977-1998 гг. (в) и 1999-2020 гг. (г).

На рис. 4 представлены поля оцененных с помощью линейного приближения изменений аномалий ТВП за весь рассматриваемый период и за выделенные три периода. Видно, что за весь рассматриваемый период рост ТВП составлял в среднем от $+0.1$ до $+0.4^{\circ}\text{C}$ за 10 лет (рис. 4а). Однако, в первый выделенный период наблюдалось понижение ТВП на большей территории исследуемого региона, в особенности, в указанных выше районах существования вечной мерзлоты (рис. 4б). Во второй период наблюдался рост ТВП в среднем от $+0.1$ до $+0.4^{\circ}\text{C}$ за 10 лет (рис. 4в). В третий же период этот рост существенно ускорился и составил в среднем от $+0.4$ до $+1.0^{\circ}\text{C}$ за 10 лет (рис. 4г). Причем, наиболее сильный рост ТВП наблюдался в северо-восточной части рассматриваемого региона, на акватории Белого и Баренцева моря.

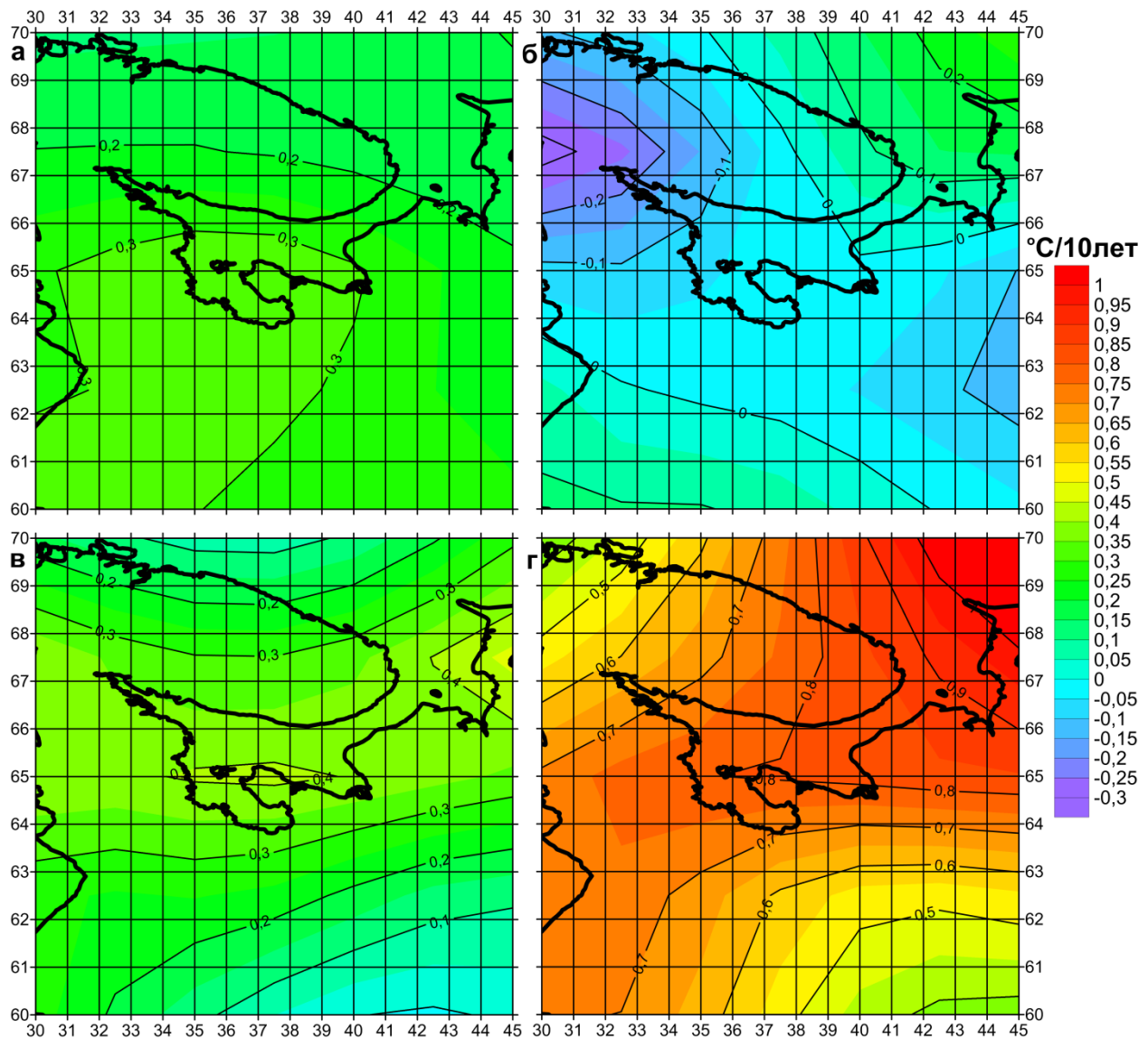


Рис. 4. Поля изменений аномалий температуры воздуха у поверхности (ТВП) оцененных с помощью линейных трендов за периоды: 1950-2020 гг. (а), 1950-1976 гг. (б), 1977- 1998 гг. (в) и 1999-2020 гг. (г).

На рис. 5 представлены поля изменений ТВП между выделенными периодами. Во второй период (1977-1998 гг.) по сравнению с первым (1950-1976 гг.) средняя ТВП увеличилась в основном в южной части рассматриваемого региона (рис. 5а). В северной же части средняя ТВП во второй период стала ниже, чем в первый. В третий период (1999-2020 гг.) средняя ТВП существенно выросла во всем рассматриваемом регионе по отношению ко второму (рис. 5б), первому (рис. 5в) и ко всему предшествующему периоду (рис. 5г). Наиболее сильно средняя ТВП в третий период увеличилась в центре западной части рассматриваемого региона, включая акваторию Белого моря.

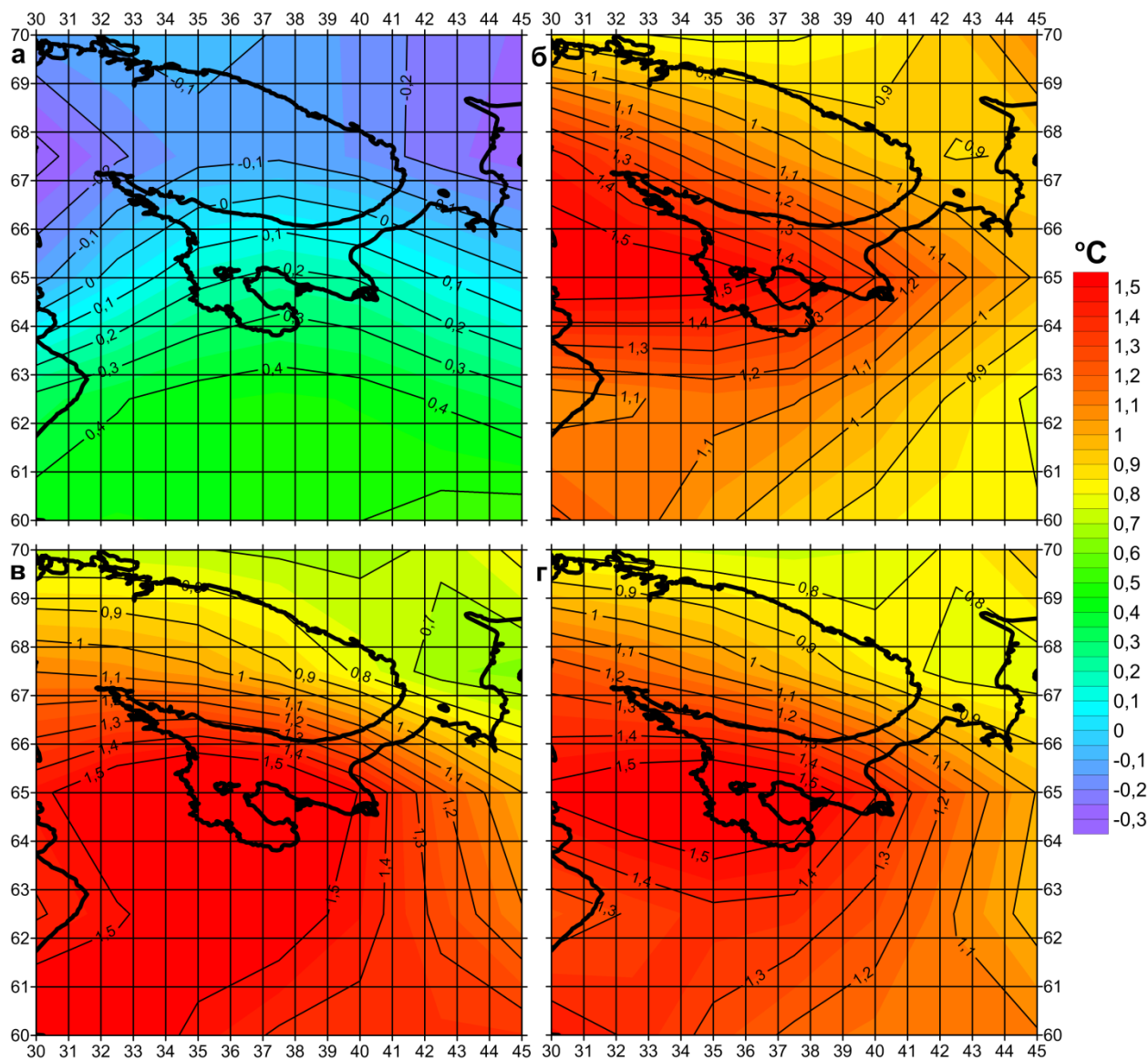


Рис. 5. Поля изменений средней температуры воздуха у поверхности (ТВП) между периодами: 1977-1998 гг. и 1950-1976 гг. (а), 1999-2020 гг. и 1977-1998 гг. (б), 1999-2020 гг. и 1950-1976 гг. (в), 1999-2020 гг. и 1950-1998 гг. (г).

Обнаруженные изменения ТВП региона Белого моря между выделенными периодами могут быть связаны как с антропогенным глобальным потеплением, так и с влиянием на исследуемый регион естественных мод климатической изменчивости. В Тихом океане в 1976/1977 и 1998/1999 годах произошли климатические сдвиги (climate shifts) [Serykh, 2016]. Они проявились в переходах между противоположными фазами Тихоокеанского декадного колебания (Pacific Decadal Oscillation – PDO) и Междекадного тихоокеанского колебания (Interdecadal Pacific Oscillation – IPO). Эти климатические сдвиги оказали глобальное влияние, в том числе и на регион Северной Атлантики.

Северная Атлантика оказывает существенное влияние на рассматриваемый регион Белого моря. Первый выделенный период (1950-1976 гг.) отличается холодными зимами и жаркими летними периодами, то есть более континентальным климатом. Как показано в работах [Byshev et al.,

2009, 2017; Бышев и др., 2011], это связано с ослабеванием влияния в этот период Северной Атлантики на исследуемый регион. Во второй выделенный период (1977-1998 гг.) зимы стали мягче, а летние аномалии ТВП стали в основном отрицательными. То есть климат исследуемого региона стал более морским по сравнению с предыдущим периодом. Это связано с усилением влияния Северной Атлантики на исследуемый регион во второй период [Byshev et al., 2009, 2017; Бышев и др., 2011].

В третий выделенный период (1999-2020 гг.) наблюдается резкий рост ТВП в исследуемом регионе. Можно предположить, что это связано с резким ростом температуры в Арктике в этот период [Cohen et al., 2014], и существенным сокращением площади морского льда в Баренцевом море [Onarheim, Årthun, 2017]. Это послужило причиной усиления положительной обратной связи в виде ослабления стратификации верхнего слоя воды Баренцева моря, усиления перемешивания и поднятия более теплых и соленых атлантических вод к поверхности [Lind et al., 2018]. Также дополнительный вклад в рост температуры воды верхнего слоя Баренцева и Белого морей вносит положительная обратная связь от поглощения солнечного излучения: при потеплении Арктики площадь льда уменьшается, и это приводит к большему поглощению солнечного излучения поверхностью [Володин, 2020]. Таким образом, резкий рост ТВП в третий выделенный период, по-видимому, связан с усилением действия обратных положительных связей, что означает переход климатической системы исследуемого региона Белого моря в новое фазовое состояние.

Заключение

Проведенное исследование показало, что в регионе Белого моря в последние 2 десятилетия (1999-2020 гг.) произошло существенное изменение регионального климата, которое выразилось в потеплении этого региона от +0.9 до +1.5°C по сравнению с предыдущими годами (1977-1998 гг.), в резком увеличении роста температуры воздуха (+0.4 - +1.0°C за 10 лет), к смещению изотермы +2°C на 550 км на север вплоть до южной части Белого моря и к полному исчезновению средних отрицательных температур. Последний факт чрезвычайно важен, поскольку это означает фазовый переход, который приведет к растеплению вечномерзлых грунтов на всей территории Карелии, Мурманской и Архангельской областей. Растепление вечномерзлых грунтов и значительное повышение средних температур приведет к изменению водного баланса многочисленных рек и озер исследуемого региона, и может оказать негативное воздействие на инфраструктуру ОАО «РЖД».

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. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики // Доклады Академии наук (ДАН). 2011. Т.438. № 6. С. 817-822.

2. Володин Е.М. О механизме колебания климата в Арктике с периодом около 15 лет по данным модели климата ИВМ РАН // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, № 2, С. 139-149.
3. Серых И.В., Костяной А.Г. О климатических изменениях температуры Балтийского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12. № 3. С. 5-12.
4. Серых И.В., Толстиков А.В. О причинах долгопериодной изменчивости приповерхностной температуры воздуха над Белым морем // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2020. № 4. С. 83-95.
5. Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V. On the spatial nonuniformity of some parameters of global variations in the recent climate // Doklady Earth Sciences. 2009. Vol. 426, No. 4, pp. 705–709.
6. Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content // Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174, No. 7, pp. 2863-2878.
7. Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C., et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather // Nature geoscience. 2014. V. 7. no. 9. P. 627–637.
8. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. Vol. 77, pp. 437–471.
9. 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).
10. Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import // Nature climate change. 2018. V. 8. no. 7. P. 634–639.
11. Onarheim I.H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. no. 16. P. 8387–8395.
12. Serykh I.V. Influence of the North Atlantic dipole on climate changes over Eurasia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016. Vol. 48, 012004.
13. Serykh I.V., Kostianoy A.G. Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature // Ecologica Montenegrina. 2019. Vol. 25, pp. 1-13.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ИЗМЕНЧИВОСТЬ МОРФОПАРАМЕТРОВ ВИДОВ РОДА *GALANTHUS* L. В РЕСПУБЛИКЕ АДЫГЕЯ

Э.А. Сиротюк, Г.Н. Гунина, А.Е. Шадже

emiliya09@yandex.ru

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

Аннотация. В работе представлены результаты исследования распространения видов подснежников на территории Адыгеи и изменчивости отдельных морфологических признаков особей в природных популяциях. Изучение внутривидовой изменчивости ряда параметров позволило выявить стабильные и переменные признаки видов и оценить полиморфизм популяций.

Ключевые слова. Подснежники, эндемики, реликты, охраняемые виды, местонахождения, популяции, внутривидовая изменчивость, коэффициент вариации.

Введение

Сокращение биоразнообразия занимает особое место среди основных экологических проблем современности, которое может привести к дестабилизации биоты, утрате целостности биосферы и ее способности поддерживать важнейшие характеристики окружающей среды. В результате необратимого перехода биосферы в новое состояние она может оказаться непригодной для жизни человека.

Под особой угрозой находятся редкие и находящиеся на грани исчезновения виды животных, растений и грибов в связи с увеличивающимся воздействием хозяйственной и иной деятельности человека на природную среду. Приоритеты охраны таких видов определены российским природоохранным законодательством, в частности «Стратегией сохранения редких и находящихся под угрозой исчезновения видов животных, растений и грибов Российской Федерации на период до 2030 года» [1]. Стратегия направлена на обеспечение сохранения и восстановления наиболее уязвимой части биологического разнообразия России и мест обитания.

Работы по сохранению биологического разнообразия растительного мира включают изучение внутривидовой изменчивости структурных и функциональных признаков растений в природных ценопопуляциях. Внутривидовая изменчивость организмов определяется варьированием ряда факторов, в том числе генотипа, стадии развития и параметров окружающей среды [2, 3] и ее анализ в природных условиях представляет сложную задачу [4]. В популяционных исследованиях считают важным изучение отдельных форм внутривидовой изменчивости, при этом имея в виду определенную условность их разграничения из-за возможности взаимопроникновения и наложения [5].

Материалы и методы исследования

Республика Адыгея находится в центральной части Северо-Западного Кавказа, в бассейнах рек Кубань, Лаба, Белая, Пшиш и Псекупс. Республика занимает уникальное географическое положение, что обуславливает наличие на ее территории нескольких географических зон и вертикальных поясов растительности, значительное ландшафтное, фитоценотическое и флористическое разнообразие, а также высокий уровень эндемизма и реликтовости. Около трети территории занимают ООПТ, 14 % земель отнесены к объекту Всемирного природного наследия ЮНЕСКО «Западный Кавказ» [6].

Географическое положение, высокая степень расчлененности, сложное геологическое строение и значительное распространение известняковых пород создают на территории Адыгеи условия, способствующие местному формообразованию, развитию эндемизма, возникновению обособленных очагов видового разнообразия растений. Так, в высокогорной флоре Фишт–Оштенского массива и Черноморской цепи выявлено 1209 видов, в том числе в высокогорной флоре Фишт–Оштенского массива и плато Лагонаки – 925 видов. Уровень эндемизма альпийских видов является одним из самых высоких на Кавказе – 43,2%. Своеобразие физико-географических условий в горах также оказывается благоприятным для сохранения реликтовых видов в рефугиумах. Например, уровень реликтовости среди альпийских видов – один из самых высоких на Кавказе и составляет 52,8% [7].

Объектами исследования являются виды рода *Galanthus* семейства Amaryllidaceae J.St.–Nil. – одни из наиболее уязвимых компонентов растительных сообществ в Адыгее. Подснежники – многолетние травянистые, олигокарпические луковичные эфемероиды, геофиты. Это фитоценотические пациенты, произрастающие в лесах и проходящие генеративный период развития зимой и ранней весной под снежным покровом до появления листвы на деревьях.

Род *Galanthus* включает 18 видов и два гибрида естественного происхождения. Ареал рода охватывает Среднюю и Южную Европу, Крым, Кавказ и Малую Азию. Наибольшее видовое разнообразие подснежников на Кавказе – 16 видов, на северном побережье Средиземного моря – два вида, на побережье Тирренского моря – четыре, Эгейского моря – три, Мраморного моря – один вид [8].

Подснежники являются реликтами древнесредиземноморской мезофитной флоры [9] и относятся к восточно-средиземноморской группе [10]. На территории России произрастает девять видов рода, из них семь видов занесены в Красную книгу РФ [11]: *Galanthus angustifolius* G. Koss, *G. bortkewitschianus* G. Koss, *G. caucasicus* (Baker) Grossh., *G. lagodechianus* Kem.-Nath., *G. platyphyllus* Traub et Moldenke, *G. plicatus* Bieb., *G. woronowii* Losinsk. На территории Республики Адыгея встречаются *Galanthus woronowii*, *G. alpinus* и *G. lagodechianus*. *Galanthus lagodechianus* впервые найден на территории республики в южных окр. г. Майкоп на хр. Нагиеж-Уащх в 2019 году [12]. В Красную книгу Республики Адыгея [13] включены два вида:

Galanthus woronowii и *G. alpinus*. *Galanthus lagodechianus* рекомендован для занесения в третье издание Красной книги Республики Адыгея.

В ходе исследования использованы литературные источники и гербарные коллекции Кавказского государственного природного биосферного заповедника им. Х. Г. Шапошникова (CSR) и Адыгейского государственного университета (МАУ). Сбор фактического материала проведен в 2017-2020 гг. в ходе экспедиционных обследований территории в окр. г. Майкоп, в Майкопском, Гиагинском и Кошехабльском районах республики. Внутривидовая изменчивость морфологических признаков генеративных и вегетативных органов растений исследована по методике С.А. Мамаева [5]. Мерой изменчивости служил коэффициент вариации (C_v , %). Материал для определения внутривидовой изменчивости отбирался у 30 особей в одной популяции каждого вида в течение одного сезона.

Результаты и обсуждение

Galanthus alpinus – эндемик Кавказа, произрастает в лесах и на опушках широколиственных лесов, в кустарниковых зарослях в нижнем и среднем горных поясах [14]. В Красной книге РФ вид отнесен к категории 2 – редкий вид, имеющий ограниченный ареал, часть которого находится на территории России [11]. В России встречается в пределах Северного Кавказа. В Республике Адыгея подснежник альпийский отмечен в Майкопском районе: горы Пшекиш и Абаго, ущелье р. Киша, долина р. Полковницкая, окр. пос. Табачный; в Кошехабльском районе: окр. а. Ходзь и с. Вольное; в Тахтамукайском районе: окр. х. Красноармейский и п. Отрадный [13]. В 2017-2020 гг. нами обнаружены новые местонахождения подснежника альпийского в Майкопском, Гиагинском и Кошехабльском районах. В Майкопском районе выявлено одно местонахождение вида, в Гиагинском и Кошехабльском районах – по три.

Galanthus woronowii – эндемик Кавказа, произрастает в лесах, по опушкам широколиственных лесов и в кустарниках нижнего и среднего горных поясов [14]. В Красной книге РФ отнесен к категории 2 – вид, сокращающийся в численности в результате чрезмерного использования человеком [11]. В России произрастает в Краснодарском [15] и Ставропольском краях [16], в Республике Адыгея [13]. В Адыгее подснежник Воронова отмечен в окр. г. Майкоп: ст. Лесная; в Майкопском районе: ур. Горелое на р. Белая, окр. пос. Гузерипль, правый берег р. Белая, долина р. Полковницкая, окр. ст-цы Дагестанская [13]. В ходе мониторинга нами выявлено пять новых местонахождений вида в Майкопском районе, два – в Кошехабльском районе.

Galanthus lagodechianus – редкий эндемик Кавказа, имеет ограниченный ареал, часть которого находится на территории России. В России до недавнего времени были известны местонахождения вида в Карачаево-Черкесской Республике [17], Кабардино-Балкарской Республике [18], Республике Северная Осетия-Алания [19], Чеченской Республике [20], Республике

Ингушетия [21], Республике Дагестан [22]. Вне России вид встречается в Республике Грузия и Республике Азербайджан [11].

Результаты исследования внутривидовой изменчивости подснежника альпийского получены нами в местонахождении в окр. п. Лесной в пойменном лесу на левом берегу р. Улька. Большинство признаков растений в популяции имеют средний уровень варьирования – ширина луковицы, ширина завязи, ширина лепестков внутреннего круга, длина нижнего листа, длина прицветника, длина цветоноса и длина цветоножки ($C_v = 16,0–21,1\%$). Очень низкий уровень варьирования показала длина лепестков внешнего круга ($C_v = 3,6\%$), низкий – длина и ширина лепестков внутреннего круга, а также ширина лепестков внешнего круга ($8,4–14,0\%$). Ширина нижнего листа и длина луковицы имеют повышенный уровень изменчивости ($C_v = 26,0$ и $32,6\%$ соответственно). Таким образом, в исследованной популяции подснежника альпийского наиболее стабильный уровень внутривидовой изменчивости демонстрирует длина лепестков внешнего круга ($C_v = 3,6\%$), наиболее изменчивый признак – длина луковицы ($C_v = 32,6\%$).

Анализ внутривидовой изменчивости подснежника Воронова проведен в популяции, произрастающей в пойме р. Курджипс перед ст-цей Дагестанская. Результаты исследования свидетельствуют о том, что большинство признаков имеют средний уровень изменчивости: длина и ширина луковицы, ширина лепестков внутреннего круга, длина цветоноса, длина и ширина нижнего листа, длина и ширина завязи ($C_v = 10,8–23,0\%$). Остальные признаки имеют низкий уровень варьирования – длина цветоножки ($C_v = 8,6\%$), длина лепестков внутреннего круга ($C_v = 10,8\%$), длина ($C_v = 11,5\%$) и ширина лепестков внешнего круга ($C_v = 11,6\%$), длина прицветника ($C_v = 11,9\%$). Таким образом, у подснежника Воронова наиболее стабильным признаком в исследованной популяции является длина цветоножки ($C_v < 10\%$), наиболее изменчивыми – ширина и длина завязи ($C_v = 23,0–23,3\%$).

Результаты исследования внутривидовой изменчивости подснежника лагодехского в единственном местонахождении в окр. г. Майкоп показывают, что большинство признаков растений в популяции имеют низкий уровень варьирования – длина луковицы, длина нижнего листа, длина прицветника, длина цветоноса, длина цветоножки, длина и ширина лепестков внешнего круга, ширина лепестков внутреннего круга ($C_v = 7,8–14,3\%$). Очень низкий уровень изменчивости имеет один признак – длина лепестков внутреннего круга ($C_v = 6,4\%$), средний уровень изменчивости – ширина луковицы ($C_v = 18,4\%$) и ширина нижнего листа ($C_v = 22,7\%$). Наиболее стабильным признаком подснежника лагодехского на территории Республики Адыгея является длина лепестков внутреннего круга ($C_v = 6,4\%$), наиболее вариабельным – ширина нижнего листа ($C_v = 22,7\%$).

Таким образом, мониторинг редких видов растений в ходе экспедиционных обследований территории республики позволяет выявлять новые местонахождения их популяций и дает возможность сравнивать изменчивость различных признаков в популяциях. В исследованных

популяциях подснежников Воронова и лагодехского большинство морфопараметров демонстрирует низкий уровень изменчивости, а у подснежника альпийского – средний. Очень высокий и высокий уровни варьирования изученных морфологических признаков не отмечены в популяциях у всех исследованных видов. Только у подснежника альпийского два признака показывают повышенный уровень изменчивости. Очень низкий уровень изменчивости одного признака выявлен у подснежников альпийского и лагодехского. В целом из исследованных популяций наиболее полиморфной оказалась популяция подснежника альпийского, что свидетельствует о большей способности нормально функционировать и поддерживать гомеостаз в различных экологических условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Кабинета Министров Республики Адыгея.

Список литературы

1. Стратегия сохранения редких и находящихся под угрозой исчезновения видов животных, растений и грибов Российской Федерации на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 февраля 2014 г. № 212-р.
2. Корочкин, Л.И. Введение в генетику развития / Л.И. Корочкин. – М.: Наука, 1999. – 253 с.
3. Лутова, Л.А. Генетика развития растений / Л.А. Лутова, Н.А. Проворов, О.Н. Тиходеев, И.А. Тихонович, Л.Т. Ходжайлова. – С-Пб.: Наука, 2000. – 539 с.
4. Злобин, Ю.А. Принципы и методы изучения ценологических популяций растений / Ю.А. Злобин. – Казань, 1989. – 147 с.
5. Мамаев, С.А. Основные принципы методики исследования внутривидовой изменчивости древесных растений / С.А. Мамаев // Индивидуальная и эколого-географическая изменчивость растений. – Свердловск, 1975. – Вып. 94. – С. 3–14.
6. Жанэ, З.К. Анализ возможностей устойчивого развития горных регионов Республики Адыгея / З.К. Жанэ // Известия ЦСИ. – 1999. – № 2. – С. 19–22.
7. Тимухин, И.Н. Реликтовость высокогорной флоры изолированных вершин Фишт–Оштенского массива и Черноморской цепи / И.Н. Тимухин, Б.С. Туниев // Plant Biology and Horticulture: theory, innovation. – 2019. – № 2 (151). – С. 21–29.
8. <http://www.theplantlist.org/>.
9. Кемулариа-Натадзе, Л.М. К изучению кавказских представителей рода *Galanthus* L. / Л.М. Кемулариа-Натадзе // Труды БИН АН ГССР. – 1947. – № 13. – С. 24–29.
10. Малеев, В.П. Третичные реликты во флоре Западного Кавказа и основные этапы четвертичной истории его флоры и растительности / В.П. Малеев // Матер., по истории флоры и растительности СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1941. – Вып. 1. – С. 61–144.
11. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы) / Гл. редколл.: Ю.П. Трутнев и др.; сост. Р.В. Камелин и др. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. – 855 с.
12. Акатова, Ю.С. О находке *Galanthus lagodechianus* Kem.-Nath. (Amaryllidaceae) в Республике Адыгея / Ю.С. Акатова, А.И. Абазова, А.С. Зернов // Бюл. МОИП. Отд. биол. 2021. – Т. 126. – Вып. 3. (в печати).
13. Красная книга Республики Адыгея: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения объекты животного и растительного мира: в 2 ч. – Издание второе. Часть 1. Введение. Растения и грибы / Гл. ред. Э.А. Сиротюк (Куваева); науч. ред.: Э.А. Сиротюк (Куваева), Т.В. Акатова, О.Н. Липка. – Майкоп: Качество, 2012. – 340 с.
14. Лозина-Лозинская, А.С. Род Подснежник – *Galanthus* L. / А.С. Лозина-Лозинская // Флора СССР. – Л.: Изд. АН СССР, 1935. – Т. IV. – С. 476–480.

15. Красная книга Краснодарского края. Растения и грибы / Адм. Краснодар. края, отв. ред. С.А. Литвинская. – 3-е изд. – Краснодар: [б.и.], 2017. – 850 с.
16. Красная книга Ставропольского края. Т. 1. Растения. – Самара: Изд-во ООО «Дом», 2013. – 399 с.
17. Красная книга Карачаево-Черкесской Республики. – Черкесск: Нартиздат, 2013. – 360 с.
18. Красная книга Кабардино-Балкарской Республики / отв. ред. М.Ч. Залиханов. Нальчик: ООО «Печатный двор», 2018. – 496 с.
19. Красная книга Республики Северная Осетия – Алания: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и животных. – Владикавказ: Проект-Пресс, 1999. – 248 с.
20. Красная книга Чеченской Республики (второе издание). – Ростов-на-Дону: ООО «Южный издательский дом», 2020. – 480 с.
21. Красная книга Республики Ингушетия: Растения. Животные. – Магас: Изд-во «Сердало», 2007. – 368 с.
22. Красная книга Республики Дагестан. – Махачкала: Типография ИП Джамалудинов М.А., 2020. – 800 с.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИДОВ РОДА *CEPHALANTHERA* RICH

Э.А. Сиротюк, В.В. Хирьянов

emiliya09@yandex.ru

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

Аннотация. В работе показаны направления исследований пыльголовников в мире и в России. Большинство значимых публикаций посвящено особенностям опыления видов, роли вегетативного размножения в поддержании популяций, зависимости сроков и длительности цветения растений от экологических факторов, в частности освещенности, а также универсальности микоризных ассоциаций для разных видов рода. Также авторы рассматривают экологические особенности видов и их реакцию на значительную антропогенную нагрузку.

Ключевые слова. Пыльцеголовник длиннолистный, пыльцеголовник красный, пыльцеголовник дамассонский, эндемики, реликты, охраняемые виды, распространение, популяции, генетическое разнообразие, опыление.

Введение

Род *Cephalanthera* – преимущественно евразийский, в настоящее время насчитывает, по разным источникам, от 15 до 20 видов во всем мире [1, 2]. Почти все они распространены в умеренной зоне Евразии, некоторые – в Северной Африке. Только один вид сапрофитных орхидей встречается на северо-западе Северной Америки, четыре вида являются эндемиками Китая [1, 3], в Европе встречается семь видов.

Все виды пыльголовников не производят нектара и представляют собой обманчивые цветки, которым свойственна неспециализированная энтомофилия. Опылителями могут быть насекомые разных систематических групп: медоносные и дикие пчелы, осы, шмели, журчалки, бабочки, но главными опылителями следует считать мух-сирфид, на долю которых приходится около 90% всех случаев опыления. Литературные данные свидетельствуют о том, что в Предуралье эти же насекомые являются основными опылителями цветков *Cephalanthera longifolia* (L.) Fritsch [4].

В литературе имеются данные о том, что исторические факторы, такие как четвертичные колебания климата, сыграли важную роль в определении уровней генетического разнообразия рода *Cephalanthera* [5]. Генетически было установлено, что в пределах своего ареала обитания, существует значительная вариация *Cephalanthera longifolia* (восемь гаплотипов). Высокая степень вариабельности характерна для *Cephalanthera rubra* (L.) Rich. (обнаруживается девять гаплотипов), тогда как *Cephalanthera damasonium* (Mill.) Druce – преимущественно автогамный вид, это, вероятно, основная причина отсутствия изменчивости вида в Западной Европе [6].

Виды рода – корневищные растения, произрастающие в тенистых широколиственных лесах, в том числе в смешанных, а также иногда в хвойных лесах, на гумусовых почвах, умеренно влажных, от кислых до нейтральных,

иногда и на карбонатных субстратах. Согласно литературным данным, у многих видов орхидных, в том числе и у пыльцеголовников умеренных широт процент плодоцветения зависит от достаточности света или его дефицита. С.А. Мамаев и др. в 2004 г. установили, что у пыльцеголовника длиннолистного в светлых мелколиственных лесах процент плодоцветения составляет 21,6–37,4%, а под пологом липовых и темнохвойно-липовых лесов – только 1,9–4,2%; у пыльцеголовника красного при нормальной освещенности в мелколиственных лесах процент плодоцветения составляет 28,1%, а в глубокой тени плодоношение почти всегда отсутствует [7]. Исследования, проведенные Н.Л. Шибановой и Я.В. Долгих в 2005-2007 гг., согласуются с литературными сведениями [8].

Cephalanthera longifolia – редкий реликтовый вид с дизъюнктивным ареалом [9]. Включен в Конвенцию о международной торговле видами дикой флоры, находящимися под угрозой исчезновения (СИТЕС, Приложение II). С.И. Коржинский и П.Л. Горчаковский считали пыльцеголовник длиннолистный доледниковым (плиоценовым) реликтом. С точки зрения С.А. Мамаева и др. (2004) уральский фрагмент ареала вида возник в одну из межледниковых эпох плейстоцена [10].

Общая продолжительность онтогенеза пыльцеголовника длиннолистного составляет 30–40 лет [11]. На Северо-Западном Кавказе он растет в сухих тенистых лиственных лесах, очень редко в хвойных лесах, в нижнем горном поясе на склонах южной, юго-западной и юго-восточной экспозиции с крутизной 5-15°. Вид распространен преимущественно в дубово-грабовых лесах с низким проективным покрытием травянистого яруса (до 30%), но способен поселяться и на вторичных местообитаниях [12]. Предпочитает почвы богатые кальцием [7], изредка растет на глинистых и торфяных почвах [13].

Пыльцеголовник длиннолистный размножается как семенным, так и вегетативным способом. Вегетативное размножение осуществляется двумя путями – делением корневища и образованием растений из придаточных почек на корнях [14]. Роль вегетативного размножения в поддержании популяций пыльцеголовника длиннолистного значительна и его интенсивность зависит от степени микотрофии растений [15]. Тип опыления *Cephalanthera longifolia* – исключительно аллогамный [16]. Цветки колокольчато-воронковидные, не содержат нектара [17]. Один из листочков околоцветника – губа, выполняет функцию посадочной площадки для насекомых опылителей [18]. *C. longifolia* привлекает неопытных опылителей своими ярко-белыми цветками. Отмечено, что привлекательность цветков безнектарных орхидей для пчел резко увеличивается при наличии в местах их произрастания, так называемых, модельных растений, цветки которых внешне похожи на цветки орхидей, но в отличие от них вознаграждают опылителей пыльцой и нектаром, например, *Polygonatum orientale* Desf., *Symphytum tauricum* Willd., *Cistus salviifolius* L. и *Convallaria majalis* L. [19].

Сроки и длительность цветения пыльцеголовников – длиннолистного, дамассонского и красного, разграничены во времени. Считается, что такая сезонная изоляция служит барьером для межвидовой гибридизации [20].

Cephalanthera damasonium – европейско–средиземноморский неморальный вид с дизъюнктивным ареалом. Включен в Конвенцию о международной торговле видами дикой флоры, находящимися под угрозой исчезновения (СИТЕС, Приложение II). *C. damasonium* – многолетнее травянистое растение с прямым крепким стеблем высотой 20-60 см и коротким горизонтальным корневищем с многочисленными корнями, глубоко проникающими в почву. Соцветие прямое, рыхлое, длинное; прицветники крупные, листообразные, ланцетные, заостренные. Цветки белые, вверх направленные, крупные (до 2 см), с желтоватой губой внутри [21].

Продолжительность цветения *Cephalanthera damasonium* значительно короче, чем у *C. longifolia* и *C. rubra*. На третий-четвертый день с момента раскрытия цветка наблюдается прорастание пыльцы в гнездах пыльника. Околоцветник закрывается, преграждая вход насекомым. По мнению многих исследователей, развитие автогамного способа опыления у орхидных связано с дефицитом соответствующих опылителей. В случае с *C. damasonium* следует отметить, что его цветки схожи по морфологии с аллогамной *C. longifolia*, но произрастание под пологом древесно-кустарникового яруса препятствует опылению. В местообитаниях с хорошей освещенностью изредка цветки *C. damasonium* посещаются пчелами из рода *Halictus*. Но аллогамное опыление возможно лишь в течение двух-трех дней с момента распускания цветка [22].

Существует положительный опыт получения каллусной культуры пыльцеголовника дамассонского флоры Крыма, для которой определены оптимальные режимы стерилизации, подобраны биологически активные вещества, питательная среда и условия культивирования *in vitro*, с целью сохранения разнообразия, введения в культуру и реинтродукции в природные местообитания, а также создание генетических банков и коллекций, для сохранения и расширения генофонда [23].

Благодаря исследованиям грибных сообществ, связанных с корнями взрослых растений *Cephalanthera damasonium* и *C. longifolia*, с использованием морфологических методов, клонирования и секвенирования внутренней транскрибированной спейсер-ДНК-полимеразной цепной реакции установлено, что ряд грибов, принадлежащих к Basidiomycota и Ascomycota, был обнаружен в корнях двух исследованных видов орхидей, демонстрируя низкую степень микоризной специфичности. По меньшей мере 11 таксонов грибов колонизируют корни *C. damasonium*, тогда как приблизительно девять видов грибов связаны с *C. longifolia*. Это показывает, что *C. damasonium*, и *C. longifolia* являются универсальными в своих микоризных ассоциациях [24].

Cephalanthera rubra – высокое изящное растение с ланцетными очередными сизовато-зелеными листьями и укороченным, восходящим или почти вертикальным корневищем. Стебель вверху опушенный, листья ланцетные, заостренные. Соцветие прямое, негустое с густоопушенной осью

из 4–12 удаленных друг от друга цветков лилово-розовой окраски с белой губой, полностью лишенных нектара. Наружные листочки околоцветника ланцетные, с пятью жилками, внутренние – яйцевидно-ланцетные. Губа одинаковой длины с наружными листочками околоцветника [21].

Cephalanthera rubra опыляют пчелы *Chelostoma distinctum* и *C. fuliginosuma*. Эти же виды пчел опыляют *Campanula taurica* Juz., имеющий пыльцу и нектар. Пчел привлекает орхидея, потому что она имитирует внешний вид *C. taurica*, а периоды цветения двух видов совпадают. В случаях, когда два растения растут вместе, происходит увеличение семян орхидеи в 7 раз, чем когда она растет в одиночку. Предполагают, что пчел привлекают кремовые ребра на губе цветка *Cephalanthera rubra*, поскольку они напоминают источники пыльцы [25]. В Швеции эта орхидея опыляется самцами пчел из того же рода за счет имитации кормового растения *Campanula persicifolia* L. [26]. Отмечается не только морфологическое сходство орхидеи с колокольчиком, но и идентичность спектрального состава, отражаемого лепестками света в видимом для пчел диапазоне. В Крыму *C. rubra* посещается пчелами: *Chelostoma distinctum* Stockhert., *Ch. fuliginosum* и *Ch. florissomne* L. Насекомые трофически связаны с тремя видами колокольчиков: *Campanula taurica* L., *C. bononiensis* L. и *C. trachelium* L. В результате значительного сходства с цветками «вознаграждающих» растений в соцветии *C. rubra* может опыляться до 90% цветков, а коэффициент продуктивности генеративного побега имеет среднее значение для видов рода [16].

В Венгрии изучалось влияние возвышенности на морфологические и репродуктивные характеристики *Cephalanthera rubra* на четырех разных высотах: в низинном дубовом лесу (103 м над ур. м.) и в буковых лесах в горах Бюкк (361- 533 м и 657 м над ур. м.). Было подсчитано число листьев, цветков и плодов, и измерены высота каждого растения, длина и ширина всех листьев. Исследование показало, что низменные и горные популяции *C. rubra* резко различаются по своей жизненной стратегии и репродуктивному успеху. Количество цветков у них сильно зависит от вегетативной продуктивности (длины и площади листьев) растений, с высотой над уровнем моря меняется и высота самих растений. На небольшой высоте орхидеи вынуждены произрастать в конкуренции с другими травами, поэтому происходит увеличение высоты растений. Кроме того, установлено, что при произрастании в горных областях *Cephalanthera rubra* чаще размножается вегетативным способом из-за недостаточного количества опылителей, что связано с местами их обитания и понижением температуры окружающей среды [27].

Отмечается, что у испытывающих значительную антропогенную нагрузку ценопопуляций (ЦП) охраняемых видов (рекреация, сенокошение, нерегламентируемый выпас скота и т.п.), онтогенетические спектры смещаются вправо – в них возрастает доля старых генеративных и сенильных особей. Однако, в некоторых случаях в таких условиях для ЦП свойственно некоторое омоложение, например, у *Cephalanthera rubra*. Для вида отмечено увеличение доли прегенеративных особей в случае антропогенной нагрузки.

По данным В.Н. Ильиной (2018) в условиях антропогенного пресса, при усилении воздействия на местообитания видов их численность неуклонно снижается, но для *Cephalanthera rubra* численность популяции восстанавливается быстрее за счет развития молодых особей, присутствующих в растительном сообществе [28].

Таким образом, анализ основных направлений исследования рода *Cephalanthera* свидетельствует о том, что многие вопросы, касающиеся экологии и биологических особенностей видов, остаются открытыми. Зарубежные исследования преимущественно направлены на изучение грибов-симбионтов, биохимии видов, анатомии, генетики и т.д. Крайне мало исследований на популяционном уровне, в том числе и российских ученых. В то же время пыльцеголовники являются редкими, занесены в Красные книги различного уровня охраны и в этой связи в настоящее время чрезвычайно актуальны популяционные исследования видов.

Список литературы

1. WCSP. World Checklist of Selected Plant Families. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. Retrieved February 12, 2020, from <http://wcsp.science.kew.org>.
2. Delforge, P. Orchids of Europe, North Africa and the Middle East / P. Delforge // A & C. Black: – London, 2006. – Pp. 1–640.
3. Flora of China. Science Press, Beijing, and Missouri Botanical Garden Press, 2009. – 25. – Pp. 174–177.
4. Демьянова, Е.И. О системах скрещивания у охраняемых растений Среднего Урала / Е.И. Демьянова // Вестник Пермского университета. Вып. 2. – 2015. – С. 91–126.
5. Effect of historical factors on genetic variation in three terrestrial *Cephalanthera* species (Orchidaceae) with different breeding system on the Korean Peninsula / Mi Yoon Chung, Nhan Thien Lu, Jordi Lopes-Puil, Sonia Herrando-Moraira et al. // Nordic Journal of Botany. – Vol. 36. – Issue 7. – 2018.
6. Plastid microsatellites for the study of genetic variability in the widespread *Cephalanthera longifolia*, *C. damasonium* and *C. rubra* (Neottieae, Orchidaceae), and cross-amplification in other *Cephalanthera* species / C. Micheneau, K.J. Duffy, Rh.J. Smith, L.J. Stevens et al. // Botanical Journal of the Linnean Society. – 2010. – Vol. 163– Pp. 181–193.
7. Мамаев, С.А. Орхидные Урала: систематика, биология, охрана / С.А. Мамаев, М.С. Князев, П.В. Куликов, Е.Г. Филиппов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 124 с.
8. Шибанова, Н.Л. Влияние условий освещения на завязывание плодов у 9 редких видов орхидных Предуралья / Н.Л. Шибанова, Я.В. Долгих // Вестник Пермского университета. – Вып. 2. – 2011. – С. 4–6.
9. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. – 855 с.
10. Ефимик, Е.Г. Новое местонахождение пыльцеголовника длиннолистного в Пермском крае / Е.Г. Ефимик // Вестник Пермского университета. Вып.3. – 2014. – С. 19–20.
11. Перебора, Е.А. Экология орхидных Северо-Западного Кавказа: монография; под общ. ред. И.С. Белюченко / Е.А. Перебора. – Краснодар: КубГАУ, 2011. – 441 с.
12. Перебора, Е.А. Орхидные Северо-Западного Кавказа [Отв. ред. И.С. Белюченко] / Е.А. Перебора. – М., Наука, 2002. – 254 с.
13. Вахрамеева, М.Г. Орхидные России (биология, экология и охрана) / М.Г. Вахрамеева, Т.И. Варлыгина, И.В. Татаренко. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. – 437 с.
14. Irmisch, T. Beiträge zur biologie und morphologie der Orchideen / T. Irmisch. – Leipzig: Ambrosius Abel, 1853. – 82 s.

15. Вахрамеева, М.Г. Пыльцеголовник длиннолистный / М.Г. Вахрамеева, Т.И. Варлыгина, П.В. Куликов // Биологическая флора Московской области. – Вып. 12. – М.: «Аргус», 1996. – С. 48-59.
16. Назаров, В.В. Репродуктивная биология орхидных Крыма: дис. канд. биол. наук. – СПб., 1995. – 294 с.
17. Фегри К., ван дер Пэйл Л. Основы экологии опыления/ К. Фегри, Л. ван дер Пэйл. – М.: Мир, 1982. – 377 с.
18. Dafni, A. The flower biology of *Cephalanthera longifolia* (Orchidaceae) – pollen imitation and facultative floral mimicry / A. Dafni, Y. Ivri // Plant Syst. Evol. – 1981. – Vol. 137. – Pp. 229–240.
19. Виды рода *Cephalanthera* во флоре Крыма и их антэкологические особенности / В.В. Корженевский, С.П. Иванов, А.В. Фатерыга, А.А. Квитницкая // Охрана и культивирование орхидей (Материалы IX Международной конференции, Санкт-Петербург, 26–30 сентября 2011 г.). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. – С. 204-210.
20. Шибанова, Н.Л. Репродуктивная биология некоторых редких видов орхидей Предуралья: автореферат дис. ... канд. биол. наук / Н.Л. Шибанова. – Пермь, 1996. – 19 с.
21. Красная книга Республики Адыгея: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения объекты животного и растительного мира: в 2 ч. – Издание второе. Часть 1. Введение. Растения и грибы / Гл. ред. Э.А. Сиротюк (Куваева); науч. ред.: Э.А. Сиротюк (Куваева), Т.В. Акатова, О.Н. Липка. – Майкоп: Качество, 2012. – 340 с.
22. Кучер, Е.Н. Репродуктивное усиление и репродуктивные тактики видов рода *Cephalanthera* Rich. в Крыму / Е.Н. Кучер // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». Том 27 (66). – 2014. – № 1. – С. 93–101.
23. Теплицкая, Л.М. Культура пыльников оридных *in vitro* и ее морфологический потенциал / Л.М. Теплицкая, Е.А. Шейко, В.Н. Лобко // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». – Т. 20 (59). – № 3. – 2007. – С.79–86.
24. Fungal diversity and specificity in *Cephalanthera damasonium* and *C. longifolia* (Orchidaceae) mycorrhizas / L. Pecoraro, L. Huang, T. Caruso. S. Perotto et al. // Journal of Systematics and Evolution. – Vol. 55 – Issue 2. – 2017. – Pp. 158-169.
25. Pollination of mimetic species *Cephalanthera rubra* (Z.) Rich. and *Campanula taurica* Juz. by bees of the genus *Chelostoma* Latr. (Hymenoptera, Megachilidae) in the Crimea / V. Nazarov, S.P. Ivanov, Simferopol'skiĭ Gosudarstvennyĭ Univ., USSR. // Entomologicheskoe Obozrenie. – 1990. – Vol. 69 – No. 3. – Pp. 534–537.
26. Nilsson, L.A. Mimesis of bellflower (*Campanula*) by the red orchid *Cephalanthera rubra* / L.A. Nilsson // Nature. – 1983 – Vol. 305. – No 5937. – P. 799-800.
27. Morphological and reproductivetrait-variability of a food deceptive orchid, *cephalanthera rubra* along differential altitudes / Gilián L.D., Endrédi A., Zsinka B., Neményi A, Nagy J.Gy. // Applied ecology and environmental research. – 17 (3). – 2019. – Pp. 5619-5639.
28. Ильина, В.Н. Онтогенетическая структура ценологических популяций некоторых редких представителей сем. Orchidaceae в условиях антропогенного пресса (Самарская область) / В.Н. Ильина // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2018. – Т. 27. – № 4(1). – С. 34–39.

ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В РЕГИОНАХ РОССИИ

А.И. Скафарик, С.В. Киселева

skafarik@mail.ru

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

Аннотация. В работе проведена оценка экономической эффективности использования станций солнечной микрогенерации (ССМ) в разных регионах РФ. Проведены расчеты производительности солнечных электростанций мощностью 15 кВт для различных климатических и тарифных зон РФ. Показано, что в ряде регионов РФ использование подобных электростанций позволяет обеспечить потребности домохозяйств в электроэнергии и приносить ежегодный доход благодаря экономии на покупке электроэнергии, а также продаже излишков электроэнергии, произведенной с использованием ССМ.

Ключевые слова. Солнечная энергетика, микрогенерация, производительность станции, графики нагрузки потребителей, экономическая эффективность.

1. Введение

Динамичное развитие секторов энергетики, основанных на использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнечное излучение, ветер, малые водные потоки, геотермальные источники, биомасса и т.д., является отличительной характеристикой нашего времени. Стимулами к использованию ВИЭ являются – в зависимости от физико-географических и социально-экономических условий стран и регионов – необходимость диверсификации энергоснабжения в условиях недостаточности углеводородных ресурсов, стратегия декарбонизации и оздоровления окружающей среды и т.п. В России при наличии огромных запасов угля, нефти и газа объективно развитие возобновляемой энергетики, которое существенно активизировалось в последние годы, определяется в основном необходимостью развития высокотехнологичных отраслей промышленности, поисками экспортных возможностей, угрозами, связанными с внедрением углеродных трансграничных налогов Европейским Союзом и другими странами – импортерами российских товаров и услуг. В то же время имеется еще одна широкая ниша использования возобновляемых источников энергии – тепло- и электроснабжение потребителей малой мощности, как сетевых, так и автономных. Для развития системы поддержки возобновляемой энергетики в части малых установок, находящихся в частной собственности граждан и отдельных организаций, в России в конце 2019 г. был принят так называемый «Закон о микрогенерации» [1]. Закон устанавливает для установок на ВИЭ мощностью не более 15 кВт возможность присоединения к централизованным электросетям и продажи/покупки избытка/недостатка электроэнергии. В связи с тем, что производительность

установок на ВИЭ определяется природными условиями (скорость ветра, приходящая солнечная радиация, гидрологический режим малых рек и т.д.), а экономическая привлекательность использования микрогенерирующих систем зависит от принятых тарифов покупки избыточной энергии и графиков нагрузки потребителей, актуальной задачей является оценка возможности и целесообразности использования автономных электростанций на основе ВИЭ в частных домохозяйствах в разных регионах страны с учетом их климатических и экономических особенностей.

2. Солнечная микрогенерация и меры ее поддержки за рубежом и в России

Солнечная энергия в настоящее время является одним из наиболее широко используемых возобновляемых источников для производства электрической энергии, как для бытовых, так и для производственных нужд. Вклад солнечной энергетики в мировое производство электроэнергии в 2019 году достиг порядка 2.7% (724 ТВтч), причем годовой прирост по отношению к 2018 году составил ~24% [2]. В то же время вклад солнечных электростанций (СЭС) в общую выработку электрической энергии в России является незначительным, хотя характеризуется приростом за последние годы: по данным Системного оператора Единой энергетической системы России (СО ЕЭС России) за 2019 выработка электроэнергии с использованием СЭС составляет 0.12%, при доле установленной мощности 0.55% [3].

В ряде стран широко распространено использование СЭС малой мощности для частных домовладений [2]. К несомненным плюсам использования СЭС для выработки электроэнергии для частных нужд относятся: простота в эксплуатации, безопасность для окружающей среды, независимость от центральных источников электроэнергии и возможность продавать избыток электроэнергии, вырабатываемой СЭС, в случае присоединения такой станции к сети. К сдерживающим факторам использования малых СЭС относятся достаточно высокая стоимость приобретения и установки оборудования, неравномерность выработки электроэнергии в зависимости от погодных условий. Однако при наблюдающемся росте тарифов на электроэнергию, поставляемую энергосбытовыми компаниями, а также снижении стоимости фотоэлектрических модулей и комплектующих СЭС, следует ожидать снижение себестоимости энергии и рост использования солнечных установок, в том числе малой мощности в России.

Развитию автономного энергообеспечения с использованием ВИЭ в Российской Федерации должен способствовать Федеральный закон N 471-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "Об электроэнергетике" в части развития микрогенерации" от 27 декабря 2019 года [1]. С принятием этого закона потребители-производители (просьюмеры), установившие у себя объект микрогенерации (например, солнечную или ветровую установку), выдающий во внешнюю сеть мощность не более 15 кВт, могут продавать гарантирующим поставщикам и иным энергосбытовым компаниям не потребленные на собственные нужды излишки электроэнергии.

Гарантирующие поставщики, в свою очередь, будут обязаны такие излишки покупать по ценам, не превышающим цены на электрическую энергию и мощность, приобретаемые гарантирующими поставщиками на оптовом рынке.

На территории России потенциальная эффективность использования солнечной энергетики сильно варьирует между регионами и в значительной степени определяется таким параметром, как уровень инсоляции (количество солнечного излучения, падающего на единицу площади поверхности), который, в свою очередь, определяется широтой местности микроклиматическими условиями и т.п. [4]. Среднегодовой уровень инсоляции (суточные суммы суммарной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность) в регионах с наибольшими солнечными ресурсами, включающие юго-западные и юго-восточные регионы России (Калмыкия, Ставропольский край, Ростовская область, Краснодарский край, Волгоградская область, Астраханская область, Алтай, Приморье, Читинская область, Бурятия) находится на уровне 4.0 – 5.5 кВтч/м² в сутки, в то время как в наименее солнечных регионах северо-запада России (Мурманская, Нижегородская, Архангельская области, Ненецкий автономный округ) – менее 3 кВтч/м² в сутки [4, 5]. Значения инсоляции значительно варьируют для большинства регионов между зимними и летними периодами, хотя в некоторых регионах, наблюдается относительно высокий уровень инсоляции в течение всего года (например, Приморье, Забайкальский край).

3. Материалы и методы исследования

3.1. Методика оценки ресурсной обеспеченности и расчета производительности систем солнечной микрогенерации на территории РФ

Выработка электроэнергии солнечными электростанциями и установками на базе фотоэлектрических модулей (ФЭМ) зависит от ряда факторов:

- 1) технических характеристик системы (пиковая мощность ФЭМ, угол наклона приемной поверхности каждого модуля и др.);
- 2) физико-географических параметров (величина приходящей радиации в течение расчетного периода и ее динамика, температура воздуха, затененность приемных поверхностей окружающими объектами, осадки (особенно снег), запыленность атмосферы и др.).

Для изучения влияния географических факторов на производительность сетевых солнечных станций малой мощности (ССМ) в качестве регионов исследования были выбраны населенные пункты РФ, располагающиеся как в Европейской части страны, так и на Дальнем Востоке в широком диапазоне географической широты. Выбор районов исследования проводился также исходя из особенностей оптового рынка электроэнергии в РФ. На территории Российской Федерации созданы и функционируют Единая энергетическая система (ЕЭС) России и технологически изолированные территориальные электроэнергетические системы [6]. Регионы страны, на территории которых функционирует ЕЭС, объединены в ценовые и неценовые зоны. В ценовых

зонах оптового рынка купля-продажа электрической энергии и мощности осуществляется по свободным ценам. Неценовые зоны – территории, где по технологическим причинам организация рыночных отношений пока невозможна, и реализация электроэнергии и мощности осуществляется по особым правилам.

На основе анализа карт приходящей солнечной радиации и особенностей оптового рынка электроэнергии, был выбран ряд населенных пунктов РФ, которые представляют интерес для рассмотрения эффективности использования станций солнечной микрогенерации (ССМ) вследствие различного сочетания экономических и физико-географических параметров: Москва, Санкт-Петербург, Астрахань, Краснодар, Туапсе, Дербент, Улан-Удэ (рис. 1).

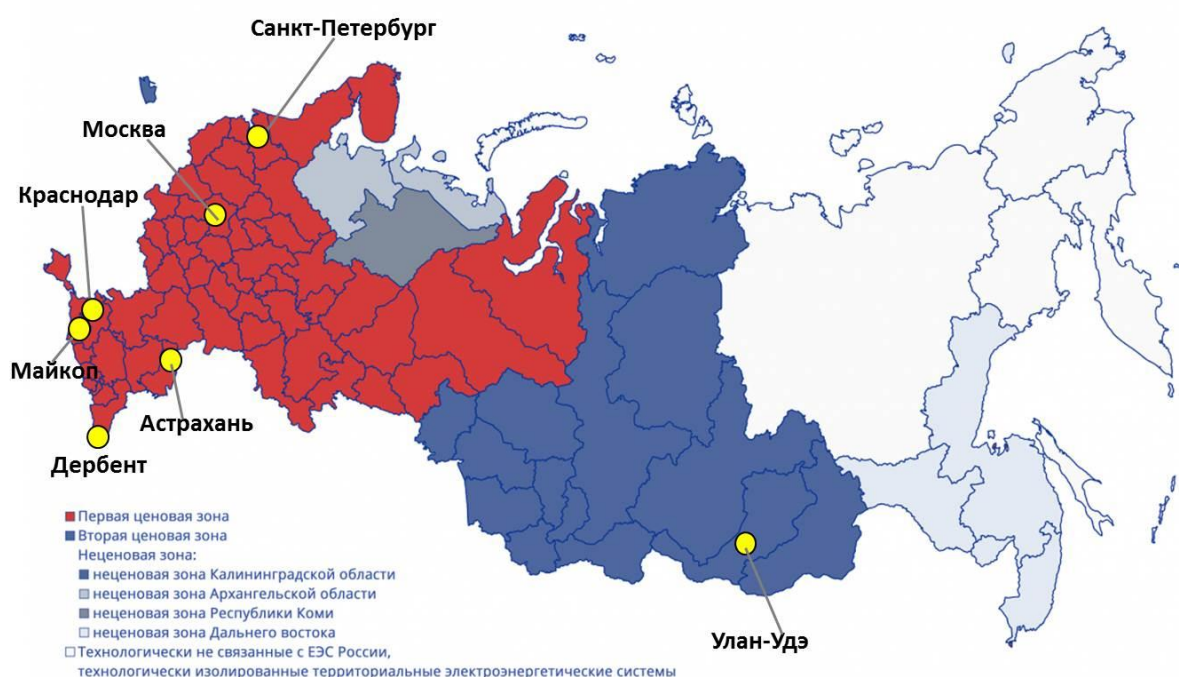


Рис. 1. Города, выбранные для расчетных экспериментов производительности ССМ, на карте оптового рынка электроэнергии РФ [6]

3.2. Источники исходных данных для расчета производительности солнечных станций

Для оценки производительности ССМ использовались суточные суммы суммарной солнечной радиации и средней суточной температуры воздуха в выбранных населенных пунктах за 2019 год. Данные были получены с использованием базы данных NASAPOWER (NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources), где в пространственной сетке (1x1)° представлен широкий спектр актинометрических и метеорологических величин, в том числе суточные суммы суммарной солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность [5]. Для оценки вариаций прихода радиации и, соответственно, вариаций производительности СЭС был также проведен анализ многолетних данных (не менее 10 лет для каждого региона).

Расчеты производительности солнечных станций были проведены с максимально возможной детализацией при имеющемся массиве исходных данных. В частности, для расчетов из суточной последовательности данных о суммарной радиации и средних температурах были получены часовые последовательности, что максимально соответствует требованиям современной солнечной энергетики при оценках производительности установок и станций (рис. 2). Для генерации часовых последовательностей предполагалось, что в течение каждого дня/суток часовой приход солнечной радиации соответствует гармонической функции (синусоидальное распределение) так, что сумма часовых значений дает суточную сумму суммарной радиации. При этом учитывается число часов сияния в каждые сутки года. Для генерации часовых последовательностей температуры воздуха, от которой зависит КПД солнечного модуля, использовался тот же алгоритм.

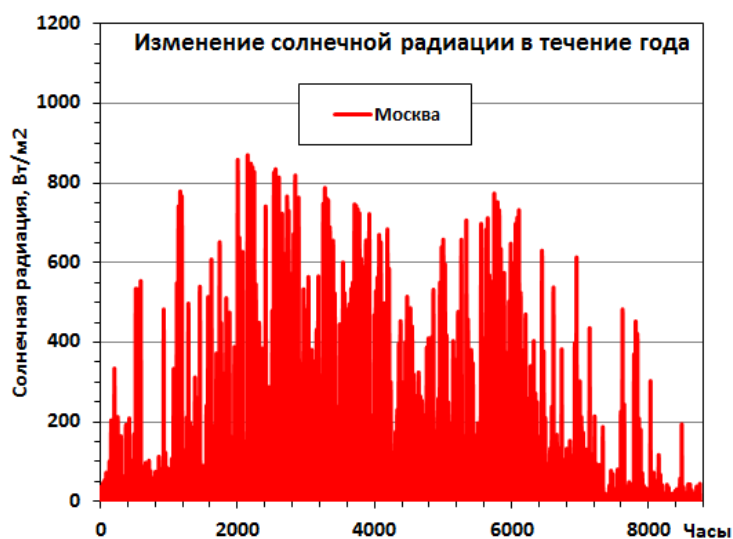


Рис. 2. Результаты расчета часовых значений солнечной радиации на наклонную поверхность для Москвы в 2019 г.

3.3. Алгоритм расчета производительности сетевых СЭС малой мощности

В соответствии с принятым законом РФ о поддержке микрогенерации [1], для оценки производительности в качестве базового объекта электрогенерации была выбрана солнечная сетевая электростанция мощностью 15 кВт. Согласно выбранному алгоритму, мощность станции определялась с дискретностью 1 час. В расчетах учитывались:

- природно-климатические условия (часовые последовательности прихода солнечной радиации на наклонную поверхность и температуры окружающего воздуха);
- технические характеристики объекта (в том числе: температурная зависимость мощности ФЭМ; КПД ФЭМ; КПД и количество инверторов в составе ССМ (инвертор является обязательным элементом сетевой станции, его КПД зависит от текущей мощности ФЭМ).

Расчеты проводились с использованием компьютерной программы PvGr_v3, разработанной в НИЛ возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ. Результаты расчета содержали:

- последовательность часовых мощностей ССМ в течение года;
- суммарные значения производительности ССМ за каждый месяц года и год в целом;

- средний коэффициент использования установленной мощности ССМ.

В результате были получены часовые последовательности мощности каждой станции, что позволяет проводить анализ производительности с любой детализацией по времени, в том числе внутрисуточных, сезонных и иных вариаций, а также сопоставление графика производительности станции и графика потребления энергии типовым потребителем. Это в свою очередь определяет возможные объемы покупки/передачи энергии в сеть от просьюмеров (производителей и потребителей энергии от ССМ).

3.4. Методы оценки экономической эффективности использования ССМ с учетом уровня потребления и тарифов на электроэнергию

В данной работе для оценки экономической эффективности ССМ в разных регионах РФ использовались следующие параметры:

- 1) A (руб.) – стоимость покупки и установки ССМ;
- 2) $T1$ (руб./кВтч) – тариф на электроэнергию для населения, значения которого варьируют между регионами. В расчетах использовался одноставочный тариф для населения, проживающего в городских населенных пунктах в домах, оборудованных газовыми плитами;

- 3) R (руб./кВтч) – цена (тариф) на электроэнергию, выработанную с использованием объекта микрогенерации (ССМ), которую просьюмер может продать гарантирующему поставщику. В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 2 марта 2021 года №299 [7] механизм расчета стоимости поставленной электроэнергии зависит принадлежности к «ценовой» или «неценовой» зоне оптового рынка, а также от ценовой категории осуществления расчетов за электроэнергию (от первой до шестой) или тарифа на электроэнергию (одноставочный или дифференцируемый в течение суток), используемых потребителем/покупателем (владельцем объекта микрогенерации). В данной работе использовалась дифференцированная по часам расчетного периода нерегулируемая цена на электрическую энергию на оптовом рынке, определяемая по результатам конкурентного отбора ценовых заявок на сутки вперед и конкурентного отбора заявок для балансирования системы по данным [8];

- 4) C (кВтч) – уровень потребления электроэнергии частным домохозяйством в заданный промежуток времени. Почасовые значения потребления электроэнергии определяются в соответствии с графиком нагрузки для выбранного объекта, и могут варьировать в зависимости от природно-климатических условий (длина светового дня, температура окружающей среды) и социальных условий (время нахождения людей на территории объекта, время подъема, отхода ко сну, ухода на работу и возвращения с нее). К сожалению, на настоящий момент не существует

открытой базы данных по реальным нагрузкам на электросети для конкретных жилых и нежилых объектов. В данной работе использовался график нагрузки, построенный на основании статистических исследований [9]. Для жилых помещений типовой график нагрузки характеризуется небольшим пиком потребления в утренние часы и вторым, более значительным, пиком потребления в вечернее время, с достижением пиковой нагрузки в 18 часов. Введено разделение величины пиковой нагрузки между зимним (октябрь-март) и летним (апрель – сентябрь) сезонами. В расчетах было принято, что суммарное годовое потребление электроэнергии объектом составляет 5.5 МВтч, что соответствует оценкам среднего потребления домохозяйства [9].

5) P (кВтч) – производительность ССМ в заданный промежуток времени (методика расчета описана в разделе 3.3).

6) Δ (кВтч) – баланс между производительностью ССМ (P) и уровнем потребления электроэнергии частным домохозяйством (C) за выбранный промежуток времени.

Экономическая эффективность (D , руб.) и срок окупаемости (N , лет) ССМ рассчитываются по алгоритму, приведенному на рис. 3 и кратко описанному ниже.

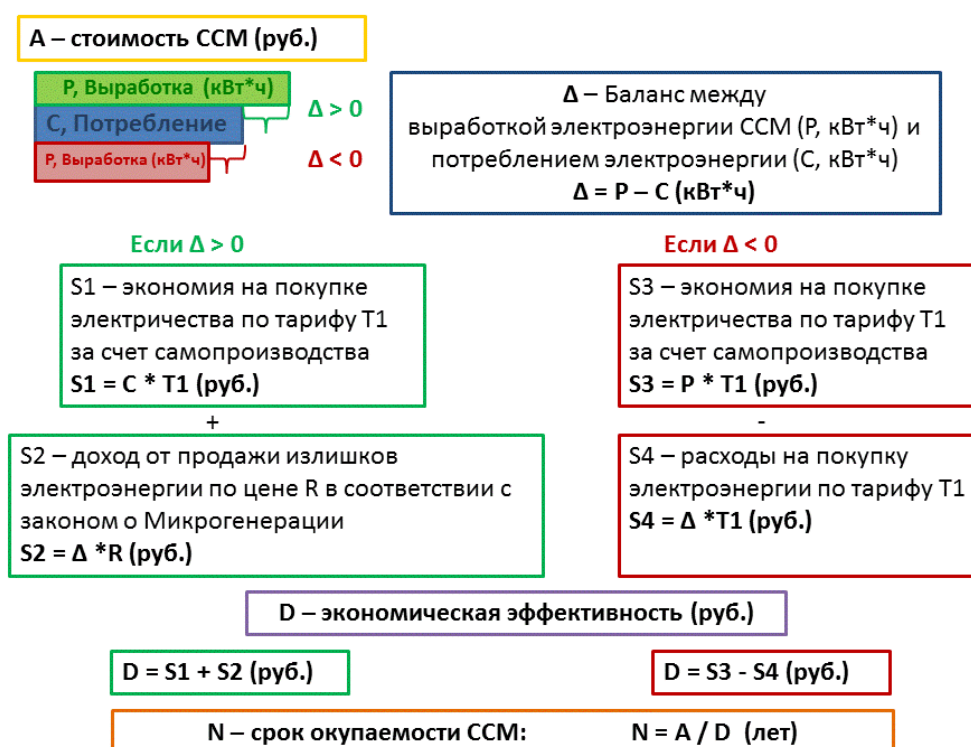


Рис. 3. Алгоритм расчета экономической эффективности использования ССМ

При использовании ССМ происходит экономия на покупке электроэнергии от гарантирующего поставщика (составляющие $S1$ (руб.) и $S3$ (руб.) на схеме). Кроме того, дополнительный доход от использования ССМ может быть получен при $\Delta > 0$, когда выработка электроэнергии превышает уровень потребления. В данном случае излишек электроэнергии

может быть продан гарантирующему поставщику по цене R (доход S_2). Однако при значениях $\Delta < 0$, выработка электроэнергии с использованием ССМ ниже заданного уровня потребления, что приводит к необходимости докупать электроэнергию у гарантирующего поставщика по тарифу T_1 . В итоге, в случае $\Delta > 0$, экономическая эффективность D рассчитывается как (S_1+S_2) , а при $\Delta < 0$ – как (S_3-S_4) . Суммарная годовая экономическая эффективность (годовой доход, D , руб.) рассчитывалась как сумма почасовых составляющих. Срок окупаемости ССМ (N , лет) определяется делением стоимости объекта микрогенерации на суммарную годовую экономическую эффективность.

4. Результаты и обсуждение

Результаты расчетов выработки электроэнергии сетевыми СЭС мощностью 15 кВт в выбранных городах РФ в 2019 году, а именно, годовая производительность и динамика производительности по месяцам приведены на рис. 4. Значения годовой выработки электроэнергии в выбранных городах варьируют от 13 030 кВтч в Санкт-Петербурге до 21 570 кВтч в Улан-Удэ. В большинстве выбранных городов наблюдается характерный вид графика производительности ССМ: высокие значения в течение летнего периода (март – сентябрь) и значительное снижение производительности в осенние и зимние месяцы.

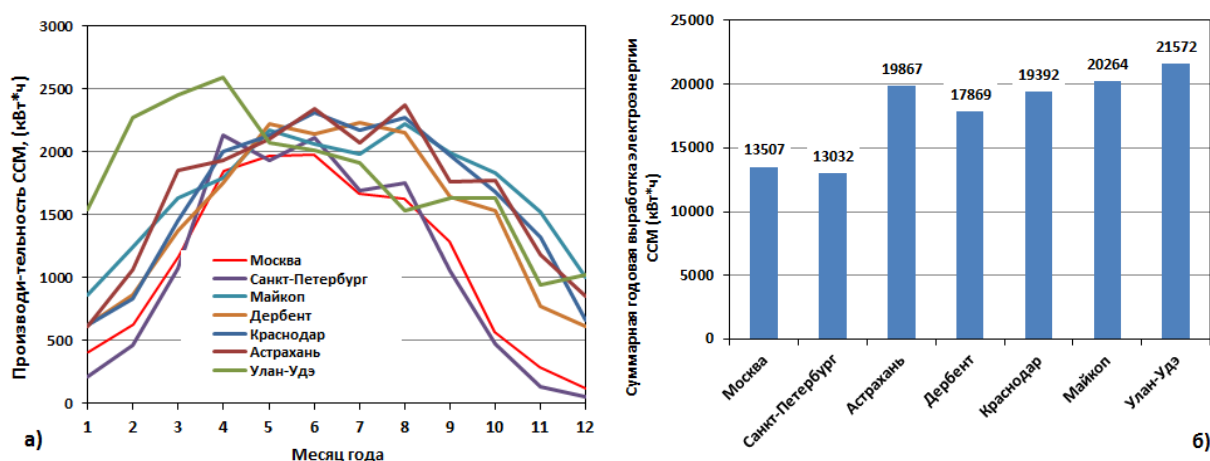


Рис. 4. а) Сводный график производительности (кВтч) ССМ мощностью 15 кВт по месяцам (2019 г.); б) значения суммарной годовой выработки ССМ за 2019 год

Результаты расчета экономической эффективности использования ССМ мощностью 15 кВт и стоимостью (капитальные затраты) 500 000 рублей в выбранных городах РФ представлены на рис. 5. Видно, что для городов, располагающихся на юге Европейской части РФ, а также Улан-Удэ положительные значения экономической эффективности от использования ССМ наблюдаются в течение всего года, кроме января и декабря, когда происходит значительное снижение выработки ССМ вследствие падения уровня солнечной радиации (рис. 5а).

Однако в абсолютных значениях годового дохода от использования ССМ отмечаются существенные различия даже между регионами со схожими

высокими суммарными годовыми значениями производительности ССМ. Так, годовой доход от использования ССМ в Астрахани, Краснодаре и Майкопе составит около 23 – 28 тыс.руб., тогда как в Дербенте – всего 13 тыс.руб., а в Улан-Удэ всего 7 тыс.руб. (рис. 5б). Данные различия объясняются вариациями тарифов на электроэнергию как для населения, так и на оптовом рынке электроэнергии. Например, оптовые цены электроэнергии в Улан-Удэ в среднем в 3 раза ниже, чем в Краснодаре, Майкопе, Москве и Астрахани, что приводит к низкому доходу от продажи излишков электроэнергии сетевым поставщикам. Соответственно, значительно различаются сроки окупаемости ССМ в выбранных городах: 18-21 год в Майкопе, Краснодаре и Астрахани, 38- 40 лет в Москве и Дербенте, 51 год в Санкт-Петербурге и почти 70 лет в Улан-Удэ, что делает использование станций микрогенерации в предложенных условиях неоправданным.

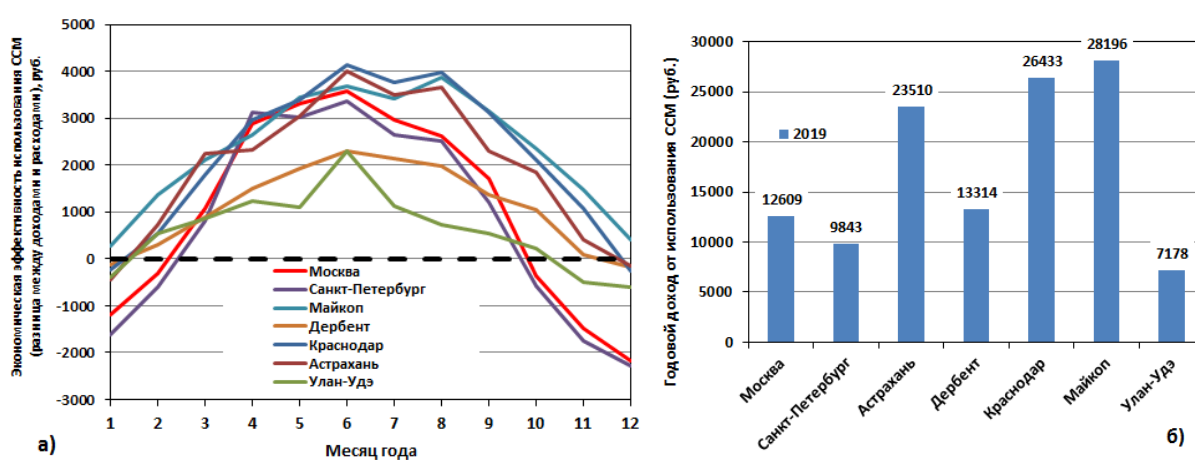


Рис. 5. а) Сводный график значений доходности от использования ССМ мощностью 15 кВт по месяцам 2019 г.; б) значения суммарного годового дохода использования ССМ в выбранных городах РФ за 2019 год.

5. Заключение

В работе предложена методика расчета производительности и экономической эффективности использования объекта микрогенерации электроэнергии (солнечная электростанция мощностью 15 кВт) с использованием данных о приходящей солнечной радиации, температуре, а также тарифах на электроэнергию и значений потребления электроэнергии для разных населенных пунктов РФ.

Отмечается, что, несмотря на высокие значения производительности ССМ в некоторых регионах РФ, позволяющие обеспечить домохозяйства собственной электроэнергией, суммарный годовой доход от использования ССМ является незначительным вследствие низких цен на продажу излишков электроэнергии. Соответственно, срок окупаемости покупки и установки ССМ мощностью 15 кВт составляет десятки лет. Для стимулирования внедрения использования объектов микрогенерации на возобновляемых источниках энергии в частных домохозяйствах РФ необходимо увеличить тарифы на

закупку электроэнергии гарантирующими поставщиками у владельцев объектов микрогенерации.

Список литературы

1. Федеральный Закон от 27.12.2019 № 471-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный Закон "Об электроэнергетике" в части развития микрогенерации"
2. BP Statistical Review of World Energy, 69th Edition, June 2020.
3. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 году, СО ЕЭС, 2020.
4. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. "Солнечная энергетика: Учебное пособие для вузов", Москва: МЭИ, 2008. – 317 с.
5. Официальный сайт Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) по данным исследования солнечной активности космическими спутниками. [Электронный ресурс] // Доступно по адресу: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Дата обращения: 19.04.2021.
6. Постановление Правительства РФ от 13.08.2018 N 937 (ред. от 30.01.2021) "Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации"
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 2 марта 2021 г. N 299 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации»
8. Составляющие предельных уровней нерегулируемых цен от Администратора торговой системы ассоциации оптового рынка электроэнергии.
9. Габдрахманова Т.С. «Исследование энергетической и экономической эффективности фотоэлектрических систем микрогенерации в условиях Российской Федерации»: дисс. к.т.н. ОИВТ, Москва, 2019.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АТМОСФЕРНОЙ ХИМИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ИФА РАН

А.И. Скороход

skorokhod@ifaran.ru

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия, г. Москва

Химия атмосферы относится к числу достаточно молодых наук. В последние годы мы наблюдаем ее быстрое развитие, связанное с высокой актуальностью таких проблем как загрязнение атмосферного воздуха и окружающей среды в целом, рост концентраций парниковых газов и связанные с этим изменения климата, нарушение взаимного обмена между атмосферой и природными и искусственными экосистемами.

Для эффективного решения актуальных задач атмосферной химии в научных исследованиях необходимо максимально задействовать весь современный инструментарий: проведение высокоточных локальных и дистанционных измерений состава атмосферы и сопутствующих параметров (метеорологические характеристики, параметры солнечной радиации, атмосферного пограничного слоя и т.д.), обработка данных наземных и спутниковых измерений, производимых отечественными, иностранными и международными сетями и орбитальными аппаратами, комплексные исследования при помощи численных математических моделей.

За последние годы ученые Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН приложили много усилий для исследований состава атмосферы и связанных с ним процессов. Одним из важнейших достижений является создание автоматизированного комплекса измерительной аппаратуры, интегрирующей современные приборы для измерения различных компонентов атмосферного воздуха, средства калибровки, управления, регистрации, архивации и первичной обработки данных измерений. Методические основы измерительной системы стали разрабатываться с середины 1990-х гг., когда в рамках уникального эксперимента TROICA проводились комплексные трансконтинентальные измерения состава и физических параметров атмосферы на специально разработанной передвижной железнодорожной лаборатории. Позднее принцип полной автоматизации комплексных измерений применялся в долговременных и краткосрочных измерительных работах в Москве, на Северном Кавказе и Кольском полуострове, в Центральной Сибири на обсерватории ZOTTO и в Калмыкии, в районе озера Байкал. С 2015 г. ИФА проводит регулярные измерения концентрации парниковых газов и других примесей над морями Северной Атлантики и Российской Арктики с научно-исследовательских судов. Для обеспечения непрерывных стационарных измерений на открытом воздухе разработаны автоматизированные комплексы на основе всепогодных термостатируемых шкафов, обеспечивающих бесперебойную работу аппаратуры в широком диапазоне температур и удобство перемещения оборудования для работы в натуральных условиях. Таким образом, сотрудниками ИФА РАН собрана уникальная база собственных высокоточных измерений

состава атмосферы в разных регионах России, которая используется в ходе научных исследований.

Помимо собственных измерений для исследований состава атмосферы над территорией Евразии используются данные наблюдательных сетей Росгидромета и международных организаций (ГСА ВМО, ЕМЕП, NDACC, TCCON, Aeronet), а также спутниковые данные среднего и высокого разрешения (AIRS, MODIS, TROPOMI и др.). Сочетание наземного и орбитального мониторинга позволяет оперативно и эффективно отслеживать влияние на состав атмосферы и качество воздуха долговременных климатических вариаций, погодных аномалий, природных пожаров, крупных локальных источников загрязнения и других явлений (например, локдаунов в разных частях мира из-за пандемии COVID-19).

Для понимания и прогнозирования изменений состава атмосферы, переноса, трансформации, накопления и осаждения загрязняющих примесей, определения источников трансграничного и локального загрязнения создан и активно используется модельный комплекс в составе глобальной математической транспортно-химической модели GEOS-chem и нескольких региональных моделей. Критически важной проблемой современной атмосферной химии является оценка выбросов (эмиссий) загрязняющих веществ и парниковых газов от различных природных и антропогенных источников. С помощью численного моделирования удалось значительно уточнить эмиссии от российских городов, природных пожаров, водно-болотных систем и определить их вклад в наблюдаемые в различных регионах России концентрации загрязняющих и климатически важных атмосферных примесей. Всестороннее исследование состава атмосферы с использованием наземных и спутниковых измерений и моделирования привело к пониманию более глубоких изменений, отражающих трансформацию всей фотохимической атмосферной системы на фоне глобального потепления и антропогенного воздействия.

Работа выполняется при частичной поддержке Российского научного фонда (грант № 21-17-00021).

МЕТОДЫ АССИМИЛЯЦИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

¹И.Д. Третьяк, ^{1,2,3}С.А. Лебедев

tretyak0id@gmail.com; sergey_a_lebedev@mail.ru

¹*Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия, г. Москва, г. Зеленоград*

²*Геофизический центр РАН, Россия, г. Москва*

³*Майкопский государственный технологический университет, Россия, г. Майкоп*

***Аннотация.** Изложены основные понятия и проведена общая постановка задачи ассимиляции данных наблюдений в математических моделях геофизической гидродинамики. Рассмотрены современные методы усвоения данных в задачах прогноза состояния гидродинамических систем, особое внимание уделено фильтру Калмана.*

***Ключевые слова.** Методы ассимиляции данных, фильтр Калмана.*

Введение

В задачах современной математической геофизики широко применяются методы математического моделирования физических систем, на основе системы дифференциальных уравнений, которые решаются преимущественно численными методами. Однако решения, полученные таким образом, содержат ошибки, так как сама математическая модель отражает состояние системы с некоторой погрешностью. Для решения дифференциальных уравнений требуются начальные и граничные условия, которые определяются из данных наблюдения за системой, которые также содержат ошибки. Поэтому результаты расчетов по моделям необходимо корректировать данными наблюдений. Это одна из самых актуальных и интересных задач современной математической геофизики. Такие задачи носят название ассимиляции (или усвоения) данных наблюдений [1].

Актуальность подобных исследований обусловлена развитием компьютерных технологий и численных методов, а также накоплением больших массивов данных наблюдений за геофизическими системами. Обработка подобных ресурсов требует развития соответствующего математического аппарата, разработки новых и совершенствование уже существующих алгоритмов и их численной реализации.

Методы ассимиляции данных можно разделить на две основные группы [1]. Первая группа включает в себя методы, основанные на вариационных принципах минимизации функционала ошибки, выражающего «расстояние» между прогнозируемым при помощи модели результатом и данными наблюдений. Самой современной их версией являются 3D-var и 4D-var методы, используемые во многих моделях прогноза термогидродинамики атмосферы национальных центрах прогноза. Вторая группа методов имеет обобщенное название «фильтрации Калмана» (Kalman filtering) и несет в себе

статистическую теорию оценивания и фильтрацию процессов с использованием «шума», обладающего известными статистическими свойствами.

Математическая модель системы и наблюдений. Постановка задачи

Пусть у нас имеется какая-то гидродинамическая система, составим её математическую модель:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = M(x, t), & t > 0 \\ x(t) = x_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где $x(t)$ – вектор состояния модели («поле»), M – соответствующий модели динамический оператор, x_0 – вектор начального состояния модели.

В задачах геофизической гидродинамике (1) – это система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями («система с распределенными параметрами»). Также мы обладаем заданной вектор-функцией данных наблюдений $y^0(t)$ удовлетворяющей уравнению:

$$y^0(t) = H(x^t, t) + \varepsilon, \quad (2)$$

где H – оператор наблюдений, x^t – истинное поле состояние системы, ε – шум, обладающий известными статистическими свойствами.

Для некоторых методов ассимиляции данных, удобнее оценивать конкретные состояния системы в конкретные моменты времени, поэтому проводят дискретизацию модели системы (1) и наблюдений (2) по времени, в следствие чего переходят к «дискретной модели»:

$$x(t_{i+1}) = M_i(x(t_i)), \quad (3)$$

$$y_i^0 = H_i(x^i(t_i)) + \varepsilon_i, \quad (4)$$

где i – номер шага по времени, t_i – дискретный момент времени, $x(t_i)$ – вектор состояния системы в момент времени t_i , M_i – разностный оператор перехода от одного момента времени к другому, H_i – оператор наблюдения в момент времени t_i , x^i – истинное поле состояние системы, в момент времени t_i , ε_i – ошибка в дискретный момент времени t_i .

Для предсказания эволюции систем в геофизической гидродинамике требуется, как правило, дополнительная информация о модели. Эту информацию чаще всего добывают из данных наблюдений. Таким образом мы приходим к *Задаче ассимиляции данных*, которая формулируется следующим образом.

При заданной функции наблюдений $y^0(t)$ требуется найти неизвестные параметры модели так, чтобы вектор состояния $x(t)$, удовлетворял исходной математической модели гидродинамической системы (1), а вектор H был близок к данным наблюдений (2). Найденное решение обозначается x^a и называется оценкой состояния системы [1].

Простейшие методы ассимиляции данных

Метод последовательных поправок или SCM-метод (Successive Correction Method). Данный метод берет свое начало от двумерной интерполяции данных наблюдений, который был улучшен благодаря

использованию поля «бэкграунда» (background) и введения области влияния для каждого наблюдения, представляющего собой поле состояния из предыдущего прогноза [2]. Суть этого улучшения состоит в анализе разности данных наблюдения и ошибок «бэкграунда», а не самих значений наблюдений, за счет оптимизации весов, приписанных каждому наблюдению. Модификация этого метода была дана Крессманом – так называемый «метод последовательных поправок» [3].

Метод последовательных поправок – это итерационный алгоритм, основная идея которого состоит в приписывании каждому наблюдению некоторого веса, зависящего от расстояния между точками наблюдений и точкой сетки, в которой делается оценка состояния, а также от «радиуса влияния»:

$$x^{k+1} = x^k + W(y^0 - H(x^k)), \quad k = 1, 2, \dots,$$

где k – номер итерации, x^0 – начальное приближение, W – весовой оператор, определяющийся характеристиками, о которых речь шла выше, H – оператор наблюдения из (2).

После k итераций полагают $x^k = x^a$ – приближенная оценка состояния системы.

Элементарные статистические методы. Подход, связанный с использованием техники статистической интерполяции в задачах ассимиляции данных, обычно называют «оптимальной интерполяцией». Суть применения статистических методов заключается в приписывании наблюдениям весов, связанных с ошибками наблюдений [4, 5]

Пусть у нас имеется множество наблюдений и данных «бэкграунда» вместе с их характеристическими ошибками. Предположим, что оператор H из (2) – линеен. Тогда анализ x^a можно определить следующим способом:

$$x^a = x^b + BH^*(H^*H + R)^{-1}(y^0 - Hx^b),$$

где $y^0(t)$ – функция наблюдений, x^b – поле «бэкграунда», H^* – оператор сопряженный к H , B – ковариационный оператор ошибок вектора x^b , R – ковариационный оператор ошибок наблюдения (т.к. мы предполагаем линейность оператора H , то операторы B и R – матрицы)

Идея такого подхода в вычислении x^a как суммы вектора «бэкграунда» и поправки, представляющей из себя действие весового оператора, определяемого ковариационными матрицами ошибок, на «инновационный» вектор (невязку наблюдений) $(y^0 - Hx^b)$.

В дальнейшем метод оптимальной интерполяции был совмещен с методом последовательных поправок, в результате получился так называемый «метод коррекции анализа»:

$$x^{k+1} = x^k + WQ(y^0 - H(x^k)), \quad y^{k+1} = y^k - Q(y^0 - H(x^k)),$$

где $y^0(t)$ – вектор наблюдений, $W = BH^*R^{-1}$. $Q = (HW + I)^{-1}$. I – единичный оператор.

После выполнения k операций полагают $x^a = x^b$.

Метод оптимальной интерполяции в современности наиболее широко используются для операционного анализа данных в задачах прогноза погоды и ассимиляции океанографических данных.

Фильтр Калмана

Обобщением метода оптимальной интерполяции является фильтр Калмана (Unscented Kalman filter – UKF) [6, 7]. Рассмотрим дискретную модель в предположении ее линейности (т.е. модель (3)–(4) с линейными операторами M_i и H_i). Кроме того, полагаем существование некоторой ошибки математической модели η_i :

$$x^t(t_{i+1}) = M(x^t(t_i)) + \eta_i, \quad y_i^0 = H_i(x^t(t_i)) + \varepsilon_i$$

На ошибки налагаются некоторые ограничения, полагаем, что η_i и ε_i – случайные векторы распределенные по нормальному закону такие, что $E\eta_i = E\varepsilon_i = 0$ (нулевые математические ожидания) и все они являются независимыми. как на каждом шаге, так и в разных моделях.

Вся «настройка» фильтра происходит за счет матриц Q_i , R_i и P_i :

1) $Q_i = E\eta_i\eta_i^T$ – ковариационная матрица ошибки модели, за счет которой увеличивается «неуверенность» в оценке состояния системы на каждой итерации фильтра. Также эта матрица, по принципу своего устройства, содержит информацию о том, на какие переменные состояния в первую очередь будут влиять ошибки модели;

2) $R_i = E\varepsilon_i\varepsilon_i^T$ – ковариационная матрица шума измерений, чаще всего определяемая из особенностей приборов наблюдений;

3) P_i и P_i^a – ковариационные матрицы состояния, определяющие «уверенность» фильтра в оценке вектора состояния. В процессе работы алгоритма эти матрицы самостоятельно корректируются, однако их начальное состояние чаще всего приходится задавать вручную. Ковариационные матрицы векторов $(x_i - x^t(t_i))$ и $(x_i^a - x^t(t_i))$ Определяются как:

$$P_i = E(x_i - x^t(t_i))(x_i - x^t(t_i))^T, \quad P_i^a = E(x_i^a - x^t(t_i))(x_i^a - x^t(t_i))^T.$$

Сам итерационный процесс устроен таким образом, что если в момент времени t_i имеется прогноз состояния системы $x^t(t_i)$ и P_i , а также информация о данных наблюдений в момент времени t_{i+1} – $y^0(t_{i+1})$ и R_{i+1} то для следующего момента времени получаем на выходе состояние системы $x^t(t_{i+1})$ и P_{i+1} . Для этого используется метод последовательных поправок в форме:

$$x_i = M_{i-1}(x_{i-1}^a), \quad x_i^a = x_i + K_i(y_i^0 - H_i x_i),$$

где: $x_i = x(t_i)$, x_i^a – искомая на шаге итерации оценка, y_i^0 – вектор данных наблюдений, K_i – весовой оператор (матрицы), носящий имя «усиление Калмана».

На каждом шаге отслеживается эволюция ковариационных матриц P_i и P_i^a , которые в предположении независимости ошибок выражаются через входные данные, как:

$$P_i = M_{i-1}P_{i-1}^aM_{i-1}^T + Q_{i-1}, \quad P_i^a = (I - K_iH_i)P_i(I - K_iH_i)^T - K_iR_iK_i^T.$$

Так как P_i^a выражает полученную ошибку оценки состояния системы, функционалом ошибки J можно считать меру погрешности следа данной матрицы trP_i^a :

$$J = trP_i^a = trE(x_i^a - x^t(t_i))(x_i^a - x^t(t_i))^T.$$

Достигаться необходимое значение будет при усилении Калмана

$$K_i = P_i H_i^T (H_i P_i H_i^T + R_i)^{-1}.$$

При подстановке такого усиления формула для P_i^a принимает вид:

$$P_i^a = (I - K_i H_i) P_i.$$

Таким образом, фильтр Калмана – алгоритм обработки данных, состоящий из двух повторяющихся фаз: *предсказание* и *корректировка*. На каждом шаге дается оценка вектора состояния x_i^a .

На этапе «*предсказания*»:

$$\begin{cases} x_{i+1} = M_i(x_i^a) \\ P_{i+1} = M_i P_i^a M_i^T + Q_i \end{cases}.$$

получается состояния системы в момент времени $t+1$ с учетом неточности математической модели.

На следующем шаге «*корректировка*» информация нового наблюдения корректирует предсказанное значение также с учетом неточности данных наблюдения.

$$\begin{cases} K_{i+1} = P_{i+1} H_{i+1}^T (H_{i+1} P_{i+1} H_{i+1}^T + R_{i+1})^{-1} \\ x_{i+1}^a = x_{i+1} + K_{i+1} (y_{i+1}^0 - H_{i+1} x_{i+1}) \\ P_{i+1}^a = (I - K_{i+1} H_{i+1}) P_{i+1} \end{cases}.$$

Кроме того, если в какой-то момент времени нет наблюдений, то без ущерба можно положить $H_i = 0$ и $K_i = 0$, тем самым полностью полагаясь на математическую модель.

Заключение

В работе был дан краткий обзор методов ассимиляции данных наблюдений в математических моделях геофизической гидродинамики в порядке их появления и развития. Одним из самых часто используемых – это фильтру Калмана. Следует заметить, что этот алгоритм был описан лишь для линейных моделей. Однако, существуют различные модификации фильтра Калмана для нелинейного случая, например, «расширенный фильтр Калмана» (Extended Kalman filter – EKF) [8, 9], который линеаризует исходную модель около некоторого известного состояния или «ансамблевый фильтр Калмана» (Ensemble Kalman filter – EnKF) [10, 11], в основе которого лежит использование метода Монте-Карло на каждом шаге.

Нельзя не упомянуть и еще одну широкую и не менее популярную группу вариационных методов, в частности, встречаемое в задачах ассимиляции данных применение методов оптимального управления для минимизации некоторого функционала, связанного с данными наблюдений.

Однако, описание данных методов очень обширно и выходит за рамки данной работы.

Список литературы

1. Ипатова В.М., Шутяев В.П. Алгоритмы и задачи ассимиляции данных для моделей динамики атмосферы и океана. Научно-образовательный курс. – Долгопрудный: МФТИ, 2013. – 30 с.
2. Gilchrist B., Cressman G.P. An experiment in objective analysis //Tellus. – 1954. – Vol. 6. – №. 4. – P. 309-318. doi: 10.3402/tellusa.v6i4.8762.
3. Cressman G. P. An operational objective analysis system //Monthly Weather Review. – 1959. – Vol. 87. – №. 10. – P. 367-374. doi: 10.1175/1520-0493(1959)087%3C0367:AOOAS%3E2.0.CO;2.
4. Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей //Известия Российской академии наук. Серия математическая. – 1941. – Т. 5. – №. 1. – С. 3-14.
5. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1963. – 288 с.
6. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82. – № 1. – P. 35-45. doi: 10.1115/1.3662552.
7. Балакришнан А.В. Теория фильтрации Калмана / Перевод с английского С.М. Зуева, под редакцией А.А. Новикова – Москва «Мир» 1988, – 171 с.
8. Ghil M., Cohn S.E., Dalcher A. Sequential estimation, data assimilation, and initialization. /The Interaction Between Objective Analysis and Initialization // Ed. D. Williamson. – Publ. Meteorol. Vol. 127 (Proc. 14th Stanstead Seminar). – Montreal: McGill University, 1982, pp. 83-97.
9. Budgell W. P. Stochastic filtering of linear shallow water wave processes //SIAM journal on scientific and statistical computing. – 1987. – Vol. 8. – №. 2. – P. 152-170. doi: 10.1137/0908027.
10. Evensen G. The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation //Ocean dynamics. – 2003. – Т. 53. – №. 4. – С. 343-367. doi: 10.1007/s10236-003-0036-9.
11. Evensen G. Data assimilation: the ensemble Kalman filter. – Berlin: Springer Science & Business Media, 2009. – 307 pp. doi: 10.1007/978-3-642-03711-5.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУФАБРИКАТОВ ДЛИТЕЛЬНОГО СРОКА ХРАНЕНИЯ

З.Н. Хатко, М.А. Тамахина

tamahinamariya@mail.ru

Майкопский государственный технологический университет,
Россия, г. Майкоп

***Аннотация.** В данной статье показана перспективность производства замороженных полуфабрикатов для получения соусов функционального назначения. Авторами предлагается конструирование нового соуса, обладающего преимущественными признаками по сравнению с классическим томатным соусом: большой срок хранения; содержание пектина, придающего функциональную направленность.*

Рациональное природопользование подразумевает экономное расходование природных богатств и ведение интенсивного хозяйства, характеризующееся применением научных достижений. Актуальным будет создание таких пищевых продуктов, которые обладают высокой пищевой и биологической ценностью и имеют долгий срок хранения.

С соусом самое простое блюдо становится ярче и вкуснее. Соусы активно используют как на предприятиях общественного питания, так и в домашних условиях. Но не всегда хватает времени, особенно для сложных соусов на бульоне, поэтому актуально будет использование готовых полуфабрикатов. Применение замороженных полуфабрикатов позволяет ускорить отдачу блюд, оптимизировать рабочий процесс, а также увеличить срок хранения продукта. Перед подачей соус требует минимальной кулинарной обработки.

В наше время актуальным остается вопрос нехватки элементов и витаминов в рационе человека. Решением является функциональное питание - использование натуральных продуктов, обогащенных биологически активными элементами [3]. Соусы могут служить основой для такого продукта. Тогда, помимо удобства использования и сохранения времени, замороженные полуфабрикаты принесут дополнительную пользу, так как станут продуктом с функциональной направленностью [5].

Цель проекта - разработка рецептуры и технологии пектиносодержащих замороженных томатных полуфабрикатов высокой степени готовности для соусов функционального назначения.

Задачи:

- 1) изучение ассортимента исследуемой группы продуктов;
- 2) обоснование выбора сырья и функционального компонента;
- 3) производство опытных образцов, сравнение разных технологий приготовления;
- 4) анализ органолептических и физико-химических показателей;
- б) выбор оптимальной рецептуры для производства полуфабрикатов.

Томатный соус - овощной соус на основе томатов. Подаётся к самым разнообразным блюдам: овощным, мясным, рыбным [4]. Имеет широкое распространение в странах, где выращивают томаты, поэтому характерен для итальянской, испанской, мексиканской, греческой, болгарской и других кухонь. Известные соусы – грузинский сацебели, итальянский болоньезе, мексиканская сальса. В разрабатываемый состав соуса включено местное растительное сырье, обеспечивающее повышенный уровень полезности. Химический состав томатов характеризуется высоким содержанием белков, углеводов, витаминов (А, В₉, С), макро- (калий, кальций, магний, натрий, фосфор) и микроэлементов (кобальт, марганец, молибден, фтор). Соус на основе томатов может использоваться и как самостоятельный, и в качестве базового для производства других соусов. Функциональную направленность соусам способны придать пектиновые вещества – полисахариды, энтеросорбенты, практически неусваиваемые пищеварительной системой человека, но стабилизирующие обмен веществ, снижающие уровень холестерина и глюкозы в крови, выводящие соли тяжелых металлов и токсины. Суточная норма пектиновых веществ составляет 2..4 г (для экологичных территорий) и 16...25 г (для загрязненных).

Польза пектина для организма неоценима. Являясь сорбентом, своей поверхностью растворимая клетчатка этого вещества собирает шлаки, токсины со стенок кишечника и мягко их выводит. Именно за это свойство его и прозвали «санитаром организма».

Соусы, созданные на основе рыбных, мясных, овощных и грибных бульонов, а также томатной пасты можно замораживать. Замораживание и хранение в замороженном состоянии отрицательно сказываются на качестве соусов, которые при размораживании имеют тенденцию к расслаиванию. Поэтому необходимо разработать технологические рекомендации, позволяющие устранить этот недостаток. Все соусы изготавливают с внесением загустителей, которые препятствуют расслоению соусов после размораживания.

В исследовании изучали три вида пектина - цитрусовый, яблочный, и пектин NH (термообратимый) (рис. 1).



Рис. 1. Пектины: цитрусовый (а), яблочный (б), NH (в)

Приготовили 1% пектиновые растворы и на кондуктометре измерили показатели растворенных веществ (табл. 1).

Как показывают данные табл. 1, однопроцентный раствор пектина NH является концентрированным.

Степень минерализации пектиновых растворов

Вид пектина	Степень минерализации, мг/л
Цитрусовый	177
Яблочный	404
NH	885

В состав соуса входят томаты, соль, сахар. Томаты бланшируют, удаляют кожицу и нарезают. В процессе приготовления применили два способа - измельчить нарезанные томаты блендером до однородности до варки (а), или довести нарезанные овощи до кипения, измельчить блендером (б), и продолжить варку (рис. 2).

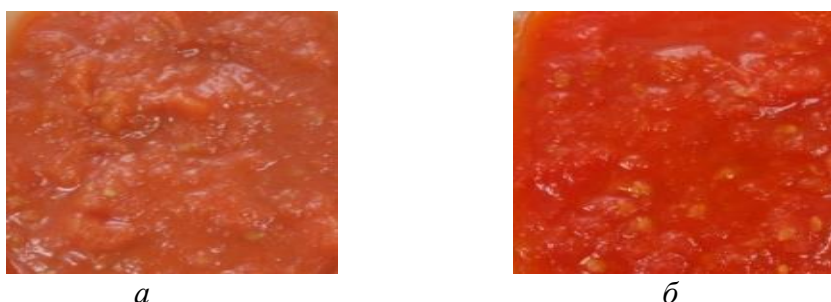


Рис. 2. Образцы с разной технологией приготовления

Как показывают данные рис. 2, образец, для приготовления которого томаты измельчали до варки, теряет цвет. Далее производство образцов будет осуществляться по второй технологической схеме, чтобы сохранить яркость. Базовая рецептура представлена в табл. 2.

Таблица 2

Базовая рецептура томатного соуса

Наименование	Масса нетто, г
Томаты	500
Сахар	25
Соль	5
Масло рафинированное	3

В ходе работы сравнили два способа внесения функционального компонента в соус. В первом случае пектин смешивали с сахаром и водой и оставляли на полчаса для набухания (рис. 3), полученную смесь вводили в кипящий соус. Во втором случае пектин смешивали с сахаром (рис. 4) и в сухом виде засыпали в соус тонкой струйкой, непрерывно помешивая, чтобы не допустить комочков. Таким образом, мы получили 7 образцов: 1 - по базовой рецептуре (контроль); 2-4 образцы - с предварительным замачиванием пектина (три вида: цитрусовый, яблочный, NH); 5-7 образцы - с сухим пектином (цитрусовый, яблочный, NH). Каждый образец варили до получения необходимой густой консистенции (табл. 3). В каждом из образцов содержится по 5 г пектина.

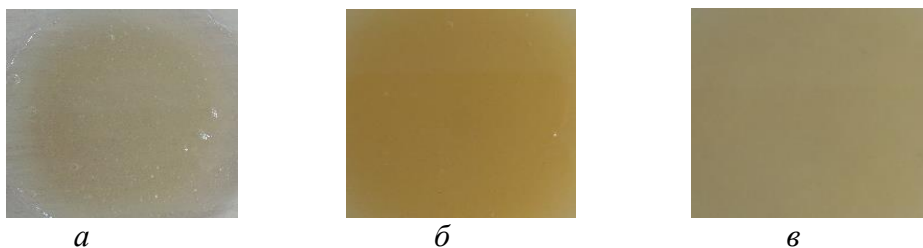


Рис. 3. Подготовленный набухший пектин для первого способа: цитрусовый (а), яблочный (б), NH (в)



Рис. 4. Подготовленный смешанный с сахаром пектин для второго способа: цитрусовый (а), яблочный (б), NH (в)

Таблица 3

Технологические характеристики производства соусов

Показатель	Характеристика образцов						
	базовый (контроль)	С набухшим пектином			С сухим пектином		
		цитрусовый	яблочный	NH	цитрусовый	яблочный	NH
Время варки, мин	40	55	55	35	40	40	40
Выход, %	42	49	49	32	58	58	42

Таблица 4

Органолептические показатели

Характеристика образцов	Органолептические показатели образцов				
	Внешний вид	Цвет	Запах	Вкус	Консистенция
1 (базовый)	масса комочками	оранжево-красный	основного компонента - томата	кисло-сладкий	неоднородная, отходит жидкость
2	гелеобразный соус				однородная, жидкая
3	гелеобразный соус				однородная, жидкая
4	пюреобразный соус			сладковатый	однородная, густая
5	гелеобразный соус			кисло-сладкий	однородная, жидкая
6	гелеобразный соус				однородная, жидкая
7	пюреобразный соус			сладковатый	однородная, густая

Как показывают данные табл. 3, образцы с внесением пектина по второму способу, быстрее получают необходимую густую консистенцию, следовательно, времени на производство затрачивается меньше. Так же, при втором способе выход (масса), получается больше, что позволяет минимизировать потери при тепловой обработке.

Сравниваем органолептические показатели полученных образцов (табл. 4).

Как показывают данные табл. 4, образец №1 (по базовой рецептуре) имеет неоднородную консистенцию с расслоением. Образцы 4 и 7 (с пектином NH), отличаются – имеют очень густую нетягучую консистенцию.

Полученные образцы заливали в квадратную форму и замораживали (рис. 5).

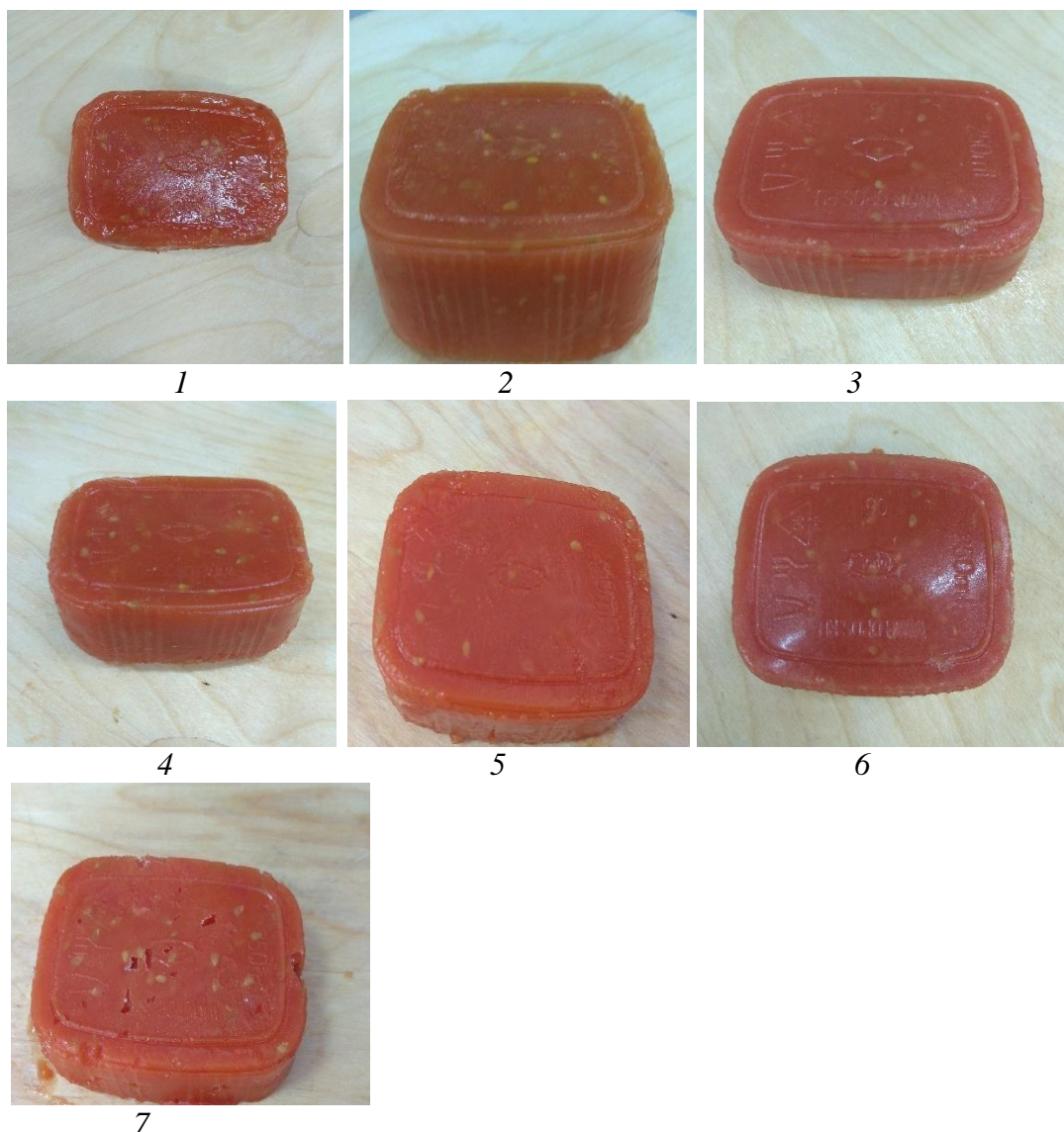


Рис. 5. Замороженные полуфабрикаты (1-7)

Далее соусы подвергли дефростации при комнатной температуре. Образцы с пектином сохранили структуру, не расслоились (рис. 6).

Провели сравнение физико-химических показателей (табл. 5)



Рис. 6. Полученные образцы после размораживания (1-7)

Таблица 5

Физико-химические показатели [1], [2]

Показатель	По ГОСТ17471-2013	Характеристика образцов						
		1	2	3	4	5	6	7
рН	-	3,57	3,44	3,37	3,71	3,27	3,33	3,52
Сухие вещества, %	17-29	19	22	21	15	19	19	12

Как показывают данные табл. 5, все полученные образцы соответствуют диапазону содержания сухих веществ.

Выводы: один из основных принципов при конструировании функционального продукта питания – такой продукт должен употребляться часто. Поэтому в качестве основы используем томатный соус, который применяется к различным блюдам, и может использоваться и как самостоятельный, и как основа для приготовления других соусов, при добавлении в состав других ингредиентов. Разное происхождение пектинов и способ внесения влияет на консистенцию, время приготовления и полученный объем, а цвет, аромат и вкус идентичен. Пектин NH дает самую густую консистенцию, следовательно, может применяться при производстве соусов, но в гораздо меньшей доле относительно цитрусового и яблочного. Рекомендованный способ внесения – в форме порошка. Так же, органолептический анализ образцов после дефростации показал, что образец без формообразователя расслаивается, тогда как остальные образцы (2-7) остаются однородными. В дальнейшем, продукт рекомендуется выпускать в форме брикета в вакуумной упаковке. Стоимость порции (250 грамм) составляет 60 рублей.

Полученные замороженные полуфабрикаты имеют следующие преимущества:

1) широкое применение (при добавлении вкусовых ингредиентов линейка соусов расширится);

2) долгий срок хранения без использования консервантов;

3) функциональную направленность, так как при употреблении порции человек получает 30 % от суточной нормы пектина.

Список литературы

1. ГОСТ 17471-2013 Консервы. Соусы овощные. Общие технические условия.
2. ГОСТ ISO 2173-2013 Продукты переработки фруктов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ.
3. Спиричев, В.Б. Обогащение пищевых продуктов витаминами и минеральными веществами. Наука и технология [Электронный ресурс]: монография / В.Б. Спиричев, Л.Н. Шатнюк, В.М. Позняковский. - Саратов: Вузовское образование, 2014. - 547 с.
4. Технология продукции и организация общественного питания. Учебник / Под ред. А.И. Мглинца. - СПб.: Троицкий мост, 2010. - 736 с.
5. Юдина, С.Б. Технология продуктов функционального питания: учебное пособие / С.Б. Юдина. – СПб.: Лань, 2017. - 280 с.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ КЛАСТЕРОВ СБРОСОВ В OFC МОДЕЛИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.С. Черепанцев

s6319a@mail.ru

Южный федеральный университет, Россия, г. Таганрог

Введение. Модель землетрясения Олами-Федера-Кристенсена (OFC) [1], вероятно, является наиболее изученной неконсервативной и близкой к модели самоорганизованного критического состояния. Простейшая OFC модель можно построить в одномерном случае. При этом модель весьма нетривиальна даже в одном измерении, а некоторые ее свойства аналогичны двумерной версии. Так же, как в двух измерениях, формируются большие синхронизированные области и присутствует фундаментальное различие между лавинами, вызванными на границах, и лавинами, возникшими глубоко внутри системы.

Модель OFC представляет собой дискретизированную и упрощенную версию модели землетрясений Берриджа-Кнопоффа [2]. В одномерной системе, состоящей из L узлов, это определяется следующими правилами [3]: на каждом узле $i=1, \dots, L$ определяется непрерывная переменная z , которая представляет локальную энергию. Энергия на всех участках увеличивается равномерно с постоянной скоростью, которую можно определить 1. Когда энергия z превышает пороговое значение Z_c , которое можно без ограничения общности выбрать равным $Z_c=1$, энергия на этом узле сбрасывается в ноль, в то время как два ближайших соседа (или единственный сосед, если место сброса является граничным) получают приращение αz . Параметр α - единственный параметр модели, $\alpha \in (0, 0.5)$. Лавинообразный процесс сброса энергии в узлах определяется тем, что если энергия в узле становится выше порога, то энергия у его соседей скачком увеличивается в соответствии с тем же правилом и также может сброситься в 0 и т.д. «Размер» формируемой лавины s определяется как количество событий опрокидывания во время последовательности связанных сбросов. После такого землетрясения энергия снова увеличивается, пока следующий узел не достигнет порога, вызывающего следующее землетрясение, и т.д.

С целью выяснения вопроса выявленных закономерностей формирования наблюдаемого степенного распределения лавин по размерам в OFC модели в различных размерностях пространства сетки узлов, рассмотрим поведение модели в простейшем одномерном случае.

Распределение среднего числа сбросов на сетке. Пусть z_i^k - значение энергии в i -ом узле ($i=1, \dots, N$) после k приращений энергии во всех узлах сетки. В этом случае k является параметром времени эволюции системы. Состояние z_i^k можно определить соотношением:

$$z_i^k = z_i^0 + \Delta F \cdot k - n_i^k F_c + \alpha F_c (n_{i-1}^k + n_{i+1}^k), \quad i = 2, \dots, N-1, \quad (1)$$

$$z_1^k = z_1^0 + \Delta F \cdot k - n_1^k F_c + \alpha F_c n_2^k, \quad z_N^k = z_N^0 + \Delta F \cdot k - n_N^k F_c + \alpha F_c n_{N-1}^k.$$

Здесь ΔF - приращение силы на одном шаге итерации, n_i^k - число сбросов, произошедшем в i -ом узле за k итераций, F_c - пороговое значение энергии, α - параметр связи соседних узлов.

Соотношение (1) определяет для граничных узлов условие открытой системы. В такой системе диссипация энергии происходит не только при сбросе отдельного узла $\Delta z = (1 - 2\alpha) F_c$, но и за счет удвоенной потери энергии для граничных узлов $\Delta z_b = (1 - \alpha) F_c$.

Следует заметить, что (1) является приближенным соотношением, предполагающим, что величина сбрасываемой энергии при превышении порогового значения близка к величине F_c .

Соотношение (1) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} (n_{i+1}^k - 2n_i^k + n_{i-1}^k) - \frac{1-2\alpha}{\alpha} n_i^k &= \frac{1}{\alpha F_c} (z_i^k - z_i^0 - \Delta F \cdot k), \\ (n_2^k - n_1^k) + \frac{\alpha-1}{\alpha} n_1^k &= -\frac{\Delta F \cdot k}{\alpha F_c}, & (n_N^k - n_{N-1}^k) - \frac{\alpha-1}{\alpha} n_N^k &= \frac{\Delta F \cdot k}{\alpha F_c}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для оценки распределения сбросов на решетке, (2) представим как разностное представление уравнения для непрерывной переменной $n(x)$, где x - координата узла на одномерной решетке:

$$\begin{aligned} n'' - \frac{1-2\alpha}{\alpha} n &= B, \\ n'(0) - \frac{1-\alpha}{\alpha} n(0) &= B, & n'(L) + \frac{1-\alpha}{\alpha} n(L) &= -B. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $B = -\frac{\Delta F \cdot k}{\alpha \cdot F_c}$. Такое приближение сделано исходя из условия, что при $k \gg 1$: $\Delta F \cdot k \gg |z_i^k - z_i^0|$.

Заметим, что в случае пространства решетки $d > 1$ уравнение сводится к уравнению эллиптического типа (уравнению Гельмгольца) со смешанными граничными условиями.

Аналитическое решение (3) может быть представлено в виде функции:

$$n(x) = \frac{2-3\alpha}{1-2\alpha} \cdot \frac{\Delta F \cdot k}{\alpha \cdot F_c} \cdot \left(\frac{\alpha}{1-2\alpha} + \frac{\operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{1-2\alpha}{\alpha}} \left(x - \frac{L}{2} \right) \right)}{\sqrt{\frac{1-2\alpha}{\alpha}} \cdot \operatorname{sh} \left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{1-2\alpha}{\alpha}} \right) + \frac{1-\alpha}{\alpha} \operatorname{ch} \left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{1-2\alpha}{\alpha}} \right)} \right) \quad (4)$$

На рис.1 показано распределение числа сбросов вдоль сетки $n(x, \alpha)$ в соответствии с (4) и приведено соответствующее распределение, полученное при расчете модели OFC в $1d$ случае.

Близость экспериментальной кривой и теоретической указывают на адекватность предложенной схемы оценки (4).

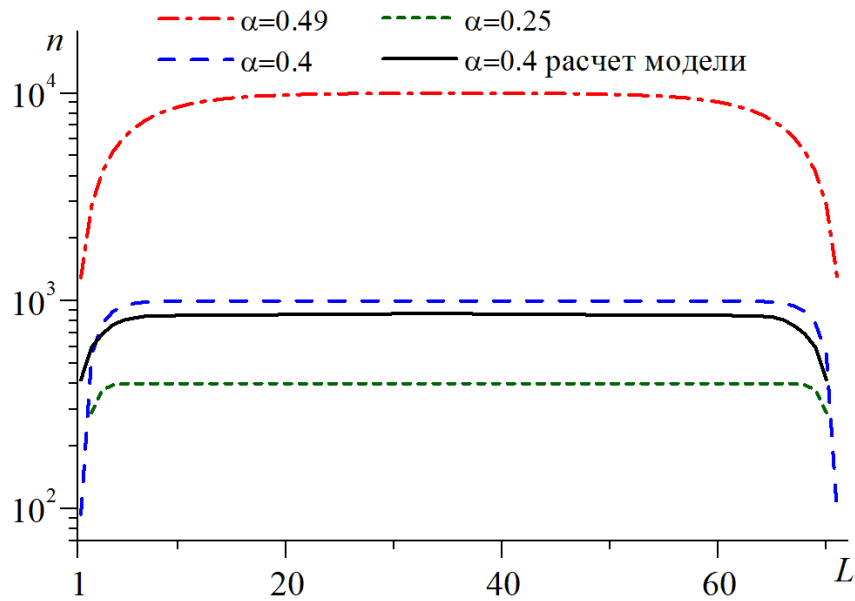


Рис. 1. Распределение числа сбросов в соответствии с (4) расчетная в модели зависимость при различных значениях параметра α . $L=70$, $T=200$ ($T = k \cdot \Delta F / F_c$).

Рост числа сбросов с увеличением параметра связи α связан с уменьшением диссипации энергии при увеличении α : $\Delta E = F_c (1 - 2\alpha)$. Это приводит к необходимости большего числа актов сброса как основного механизма компенсации поступающей в систему энергии в стационарном режиме.

Различная скорость приращения энергии для соседних ячеек характерна для приграничных областей. Эта закономерность повышает вероятность относительных значений энергии в соседних узлах в приграничных областях, достаточных для формирования кластеров и их дальнейшего роста. На рис. 1 показана начальная эволюция модели OFC в 2d пространстве с формированием кластеров в приграничных областях решетки.

Особенности переходного режима к стационарному состоянию в OFC модели на сетках различной размерности

Для анализа поведения OFC модели при формировании картины устойчивого степенного распределения рассмотрено развитие кластеров лавин на решетках различной размерности. На рис. 2 представлены зависимости времени достижения сброса от его размера для размерности сетки $1d$, $2d$, $3d$. Имеющиеся данные указывают, что $2d$ и $3d$ модели демонстрируют степенную функцию плотности распределения размеров сбросов с показателем, близким к 2. При этом в $1d$ модели предельное степенное распределение отсутствует [3]. Предельное распределение в этом случае формируется либо в как синхронный сброс всех узлов сетки, либо как наличие нескольких сегментов сбрасываемых в различное время.

Представленные на рис. 2А, кривые роста размера сброса со временем указывают на существование начального участка роста с резким ростом размером размеров сбросов и дальнейший рост $T = T_0 \cdot S^\gamma$ с показателем степени $\gamma \approx 1$. Такой линейный рост получен для $1d$ модели с различными значениями параметра диссипации $\delta = 1 - 2\alpha$.

В отличие от $1d$ модели, в случае $2d$ и $3d$ пространственной решетки узлов, рост времени достижения кластера заданного размера имеет степенную зависимость с $\gamma > 1$ (рис. 2Б,В). При этом показатель γ слабо зависит от параметра связи $\alpha = \frac{1-\delta}{2d}$. Это указывает на иной механизм формирования кластеров.

Будем предполагать, что подобно $1d$ модели, вероятность захвата граничным узлом кластера соседнего узла вне кластера определяется величиной, зависящей от α . С ростом α вероятность $P(\alpha)$, а следовательно и скорость роста кластера также увеличивается. В $1d$ модели граничных ячеек две. Скорость роста кластера является постоянной величиной при фиксированном α :

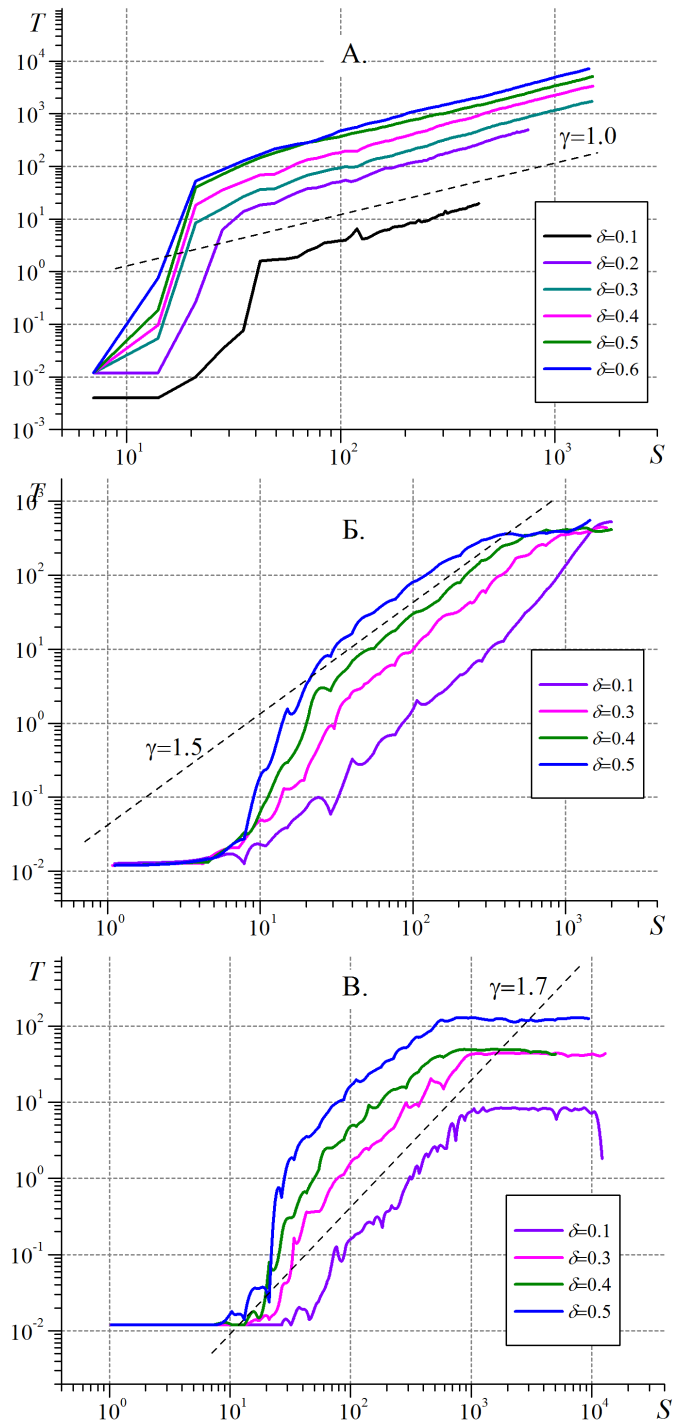


Рис. 2. Зависимость времени возникновения кластера от его размера при различных параметрах диссипации δ . А.- $1d$, Б.- $2d$, В.- $3d$.

$$\frac{dT}{dS_1} = c(\alpha).$$

В случае же моделей больших размерностей число граничных узлов кластера зависит от размера кластера и размерности пространства. Рассмотрим простейший механизм роста кластера исходя из условия, что один граничный узел кластера может захватить один внешний узел с вероятностью $P(\alpha)$. Число граничных узлов и размер кластера можно определить как

$$N_b = \lambda \cdot L^{d-1}, \quad S_d = \chi \cdot L^d,$$

где: λ, χ - параметры формы кластера, L - линейный размер кластера. Тогда

$$\frac{dT}{dS_d} = N_b \cdot \frac{dT}{dS_1} = c(\alpha) \cdot \lambda L^{d-1} = c(\alpha) \cdot \lambda \left(\frac{S_d}{\chi} \right)^{\frac{d-1}{d}} \quad (5)$$

Проинтегрировав (5):

$$T = \frac{c(\alpha) \cdot \lambda}{\chi^{\frac{d-1}{d}}} S_d^{2-\frac{1}{d}} \quad (6)$$

Соотношение (6) дает линейную связь $T \sim S^1$ при $d=1$, $T \sim S^{\frac{3}{2}}$ при $d=2$ и $T \sim S^{\frac{5}{3}}$ при $d=3$. Как показано на рис. 2 степенные показатели модельных зависимостей оказываются близкими к зависимости (6).

Список литературы

1. Z. Olami, H.J.S. Feder, K. Christensen, Self-Organized Criticality In A Continuous, Nonconservative Cellular Automaton Modeling Earthquakes, Phys.Rev. Lett. 68, 1244-1247. 1992.
2. Burridge R., Knopoff L., Model and Theoretical Seismicity, Bull. Seism Soc. Am. 57, 341-371, 1967
3. Wissel F., Drossel B., The Olami–Feder–Christensen earthquake model in one dimension, New J. Phys., 7, 5, 2005.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЙ ПИРОЛИЗА И ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО СЖИЖЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ ИЗ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

Н.И. Чернова, С.В. Киселева

chernova_nadegda@mail.ru; k_sophia_v@mail.ru

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

географический факультет, Россия, г. Москва

Аннотация. В представленной работе рассматривается микроводорослевое направление биоэнергетики, которое включает в себя выращивание биомассы микроводорослей (МКВ) с последующим получением бионефти, синтез-газа и биоугля технологиями пиролиза и гидротермального сжижения (HTL). Приводятся результаты сравнительного анализа использования этих технологий для получения энергетических продуктов из МКВ. Как и другие виды биомассы, МКВ как сырье для производства биотоплива и энергии являются “СО₂-нейтральными”. Кроме того, технологии производства биомассы МКВ в открытых и закрытых системах могут быть оптимизированы под аккумуляцию и улавливание диоксида углерода в биомассе МКВ с последующим переводом ее в геологически стабильные формы.

Ключевые слова. Микроводоросли/цианобактерии, культивирование, пиролиз, гидротермальное сжижение, бионефть, биоуголь.

1. Введение

В настоящее время перед производителями энергии и топлива – как на основе ископаемого топлива, так и возобновляемых источников энергии – стоят задачи получения не только конкурентоспособного продукта, но и продукта, полученного с минимальными выбросами углекислого газа. Причем это требование относится и к процессу производства топлива и энергии, и к их использованию. Все чаще крупные игроки традиционной энергетики (добывающие и генерирующие компании) решают эту задачу путем осуществления масштабных проектов улавливания и захоронения выбросов СО₂. Так, несмотря на известные экономические трудности в мире из-за пандемии коронавируса, крупнейшие компании Equinor, Shell и Total в мае 2020 года в Париже достигли соглашения об инвестициях в проект «Northern Lights» по строительству и эксплуатации хранилища углекислого газа на норвежском континентальном шельфе [1]. Сокращение и стабилизация эмиссии СО₂ является одной из приоритетных задач для мировой общественности. Секвестирование углекислого газа (CCS, Carbon Capture and Storage) – процесс захвата СО₂ из источника выбросов, транспортировка и долгосрочное захоронение в геологических формациях – представляется связующим звеном между сегодняшней энергетикой на органическом топливе и последующим переходом к возобновляемым источникам энергии [2].

МКВ как возобновляемый ресурс нетрадиционный непищевой считаются перспективным сырьем для производства биотоплива третьего и

четвертого поколений, поскольку имеют более высокие темпы роста, чем наземная биомасса и при этом не конкурируют с производством продуктов питания и кормов. Благодаря простой структуре и доступному питанию МКВ обладают теоретически более высокой эффективностью фотосинтеза (до 12,6%) по сравнению с наземными растениями [3]. При этом изъятие культивируемой биомассы МКВ для нужд энергетики не нарушает естественную консервацию органического вещества в биосфере, и плантации водорослей служат эффективным краткосрочным стоком антропогенного CO₂, конвертируя его в энергию высокой плотности. Этот фактор позволяет при оценках энергоэффективности получения биотоплива из МКВ учитывать секвестирование CO₂. Следует отметить, что водорослевые технологии рассматриваются среди существующих стратегий долгосрочного улавливания и секвестирования CO₂, а именно: 1) захоронение всей биомассы водорослей в глубоких геологических формациях; 2) захоронение извлеченных из биомассы водорослей богатых углеродом фракций; 3) преобразование биомассы МКВ технологией гидротермального сжижения, приводящей к конверсии 55% углерода биомассы в биоуголь, содержащий порядка 90 % углерода, с последующим захоронением этого геологически стабильного биоугля.

Несмотря на многочисленные успехи, достигнутые в течение последних десятилетий, коммерциализация производства водорослей остается сложной задачей из-за высокой неконкурентной цены на произведенное биотопливо. Поэтому актуальным остается повышение эффективности конверсии биомассы МКВ в биотопливо и расширение полезных продуктов такой конверсии. В этой связи мы исследовали трансформацию выращенной биомассы МКВ технологиями пиролиза и гидротермального сжижения. Одним из основных преимуществ технологии HTL является отсутствие стадии предварительной сушки исходного сырья. МКВ могут подаваться в реактор гидротермального сжижения во влажном состоянии, например, в виде водной суспензии. Еще одним преимуществом является то, что в процессе гидротермального сжижения вклад в выход бионефти вносят не только липиды, но также углеводы и белки, что повышает суммарный выход более эффективного энергетического продукта.

2. Материалы и методы исследования

Как отмечалось в предыдущей работе [4], сине-зеленая микроводоросль/цианобактерия *Arthrospira platensis rsemsu* служит нам модельным объектом для изучения технологий выращивания биомассы и ее дальнейшей трансформации в биотопливо. Объектом данного исследования была ранее выделенная культура *A. platensis rsemsu Bios* с прямыми трихомами, образовавшимися в результате естественной морфологической изменчивости при многолетнем полунепрерывном культивировании в лабораторных условиях при освещенности $25 \pm 3 \mu\text{E} / (\text{м}^2 \times \text{сек})$ и температуре $T = 21 \pm 2^\circ\text{C}$ в двух плоскостных культиваторах открытого типа объемом 500 л каждый с поверхностным перемешиванием на питательной среде Заррука [5]. Культура *A. platensis rsemsu Bios* представлена устойчивым консорциумом

МКВ с гетеротрофными бактериями-ассоциантами, идентифицированных нами как представители родов *Pseudomonas* и *Bacillus*. Сконцентрированная путем фильтрации биомасса высушивалась до воздушно-сухого состояния (влажность около 3 %). В табл. 1 для используемой в экспериментах биомассы *A. platensis* представлен элементный состав (анализатор VARIO ELIII Elementar Analysen systeme GmbH), содержание золы, (термоанализатор Simultaneous SDT Q600), биохимический состав (содержание белков, липидов и углеводов согласно известным методикам [6–8]) и низшая теплота сгорания по формуле Менделеева для твердых топлив.

Таблица 1

Характеристика исходной биомассы *A. platensis*: элементный состав (на сухое беззольное состояние; содержание кислорода определялось вычитанием), содержание золы (на рабочее состояние), влажность, биохимический состав (масс. %) и низшая теплота сгорания (на сухое беззольное состояние)

Элементный состав, масс. %					Зольность, масс. %	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Биохимический состав, масс. %		
С	Н	N	S	О			Белки	Липиды	Углеводы
61,3	6,4	8,8	1,0	22,5	5,1	25,04	60,1	10,3	9,8

Эксперименты по изучению процессов пиролиза и гидротермального сжижения биомассы микроводорослей проводились на двух экспериментальных установках ОИВТ РАН. Пиролиз осуществлялся в среде чистого азота марки 6.0 для создания бескислородной среды с линейным темпом нагрева 10 °С/мин от комнатной температуры до 1 000 °С. Отбор проб газа для хроматографического анализа (CO, CO₂, N₂, H₂, C_nH_m) проводился при температуре 300 °С, 400 °С, 500 °С и 600 °С. Хроматографический анализ проводился на хроматографе Хроматэк Кристалл 5000.1. Количество биомассы микроводорослей, подвергающейся пиролизу в единичном эксперименте, составляло порядка 15 г по сухому веществу, скорость нагрева сырья в чаше – 10 °/мин. При пиролизе МКВ обычно температурный режим поддерживается между 400 и 600°С, но в некоторых случаях температура может достигать и 800°С, процесс идет в бескислородной среде с сухой биомассой. Основные параметры и преимущества технологии гидротермального сжижения (отсутствие стадии предварительной сушки исходного сырья и конверсия всех составляющих биомассы) были описаны нами в работе [4].

3. Результаты и их обсуждение

В результате процесса пиролиза биомассы артроспиры образовалось 3 продукта: пиролизная жидкость (бионефть), неконденсируемые пиролизные газы и биоуголь (рис. 1). Летучие продукты образуются в процессе пиролиза вследствие первичного разложения биомассы микроводорослей и вторичного расщепления паров. Пары (конденсируемые газы), состоящие из более тяжелых молекул, при охлаждении конденсируются и образуют бионефть. Газы, содержащие молекулы с более низким молекулярным весом, такие как

диоксид и монооксид углерода, водород и метан, не конденсируются во время охлаждения.



Рис. 1. Исходная биомасса МКВ (слева) и биоуголь после пиролиза (справа)

Было показано, что весь процесс пиролиза протекает в области эндотермии (кривая теплового потока полностью находится в области отрицательных значений). Энергетические продукты конверсии биомассы *A. platensis Bios* при 600°C технологией пиролиза были следующие:

- Количество пиролизной жидкости (бионефть), полученной в экспериментах с биомассой МКВ, составило около 21,9 % от исходной массы.

- Количество неконденсируемых пиролизных газов, полученных из исходного образца, составило 1,15 л, в пересчете на сухое состояние образец содержит 76,7 масс. % летучих соединений в своем составе. т.е. удельный объемный выход газа (количество газа, выделяющегося из 1 кг исходного материала) составил 0,076 м³/кг).

- Твердый остаток (биоуголь) пиролиза составил около 27,0 масс. % от начальной массы образца.

Изменение состава неконденсируемых пиролизных газов, образующихся в эксперименте при температурах 300, 400, 500, 600°C, представлено на рис. 2. Видно, что СО₂ составляет основную часть газовой смеси при температурах нагрева вплоть до 600 °С и доходит практически до 90 об.% при 300°C. При температурах нагрева свыше 500°C содержание СО₂ существенно уменьшается, тогда как содержание высококалорийных неконденсируемых горючих газов (метан, водород, монооксид углерода) увеличивается, что приводит к повышению теплотворной способности газовой смеси. Основным компонентом газовой углеводородной смеси является метан на протяжении всего процесса пиролиза исходного материала (рис. 3).

Выход получаемых газов и их состав зависят от биохимического состава МКВ, температуры процесса, времени удержания биомассы и др. Судя по кривым зависимости состава газа от температуры процесса пиролиза, при 600°C (рис. 2-3) газообразование не достигает своего максимума: по-видимому, можно ожидать некоторое увеличение содержания таких высококалорийных газов как Н₂ и СН₄ в конечном продукте.

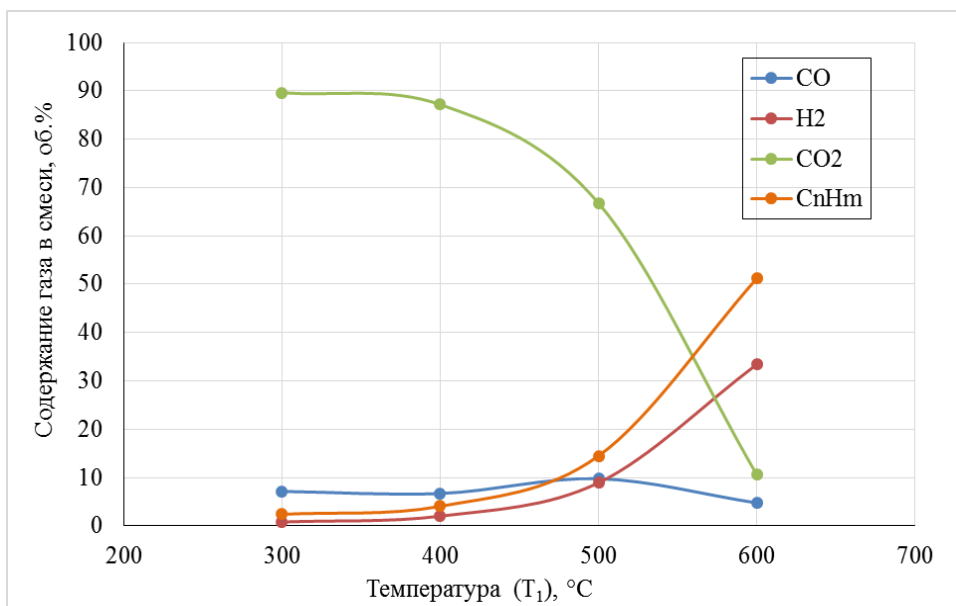


Рис. 2. Зависимость состава неконденсируемых пиролизных газов от температуры нагрева сырья

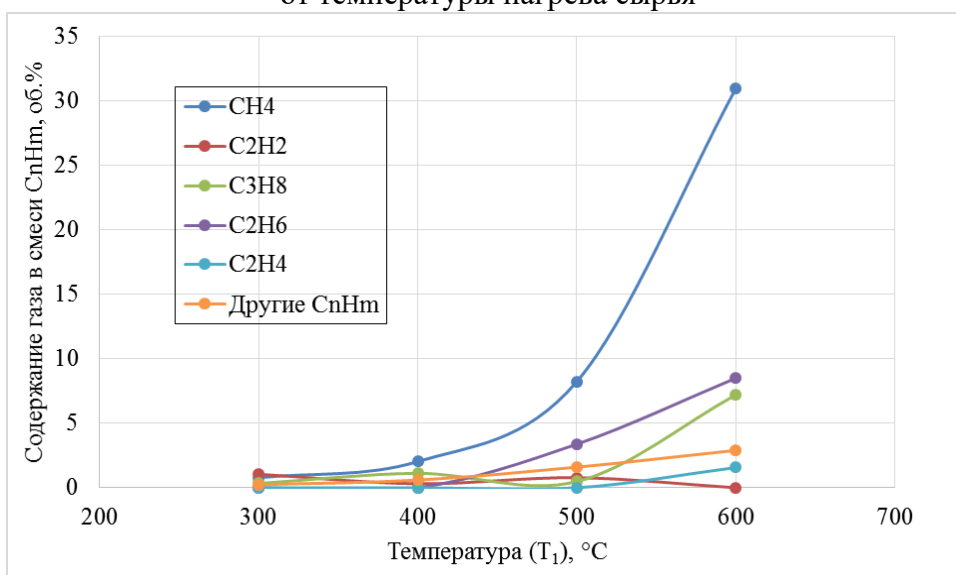


Рис. 3. Зависимость состава углеводородной смеси газов (C_nH_m) от температуры нагрева сырья

Гидротермальное сжижение биомассы *A. platensis rsemsu Bios* было проведено при следующих температурах: 270°C, 300°C and 330°C (табл. 2). Средние значения выхода бионефти конверсией биомассы НТЛ при повышении температур составили 34,6%, 38,8% и 45,7% соответственно, биоугля - 28,7%, 28,7% и 26,0%.

Таблица 2

Продукты конверсии гидротермальным сжижением биомассы *A. platensis* при 270°C, 300°C and 330°C [9]

НТЛ-продукты	Температура, °C		
	270°C	300°C	330°C
Бионефть, %	34,6	38,8	45,7
Синтез-газ, %	12,7	14,8	17,5
Биоуголь, %	28,7	27,4	26,0
Водная фаза, %	24,0	19,0	10,8

Как видно из табл. 2 биоуголь/биочар при гидротермальном сжижении МКВ артроспиры образуется в значительном количестве (от 26,0 до 28,7%) в зависимости от температуры процесса, поэтому эта технология конверсии МКВ в биотопливо предлагается как способ захоронения CO₂ в виде биоугля.

4. Выводы

1) Осуществлена конверсия биомассы микроводорослей *A. platensis* *rsemsu Bios* (выращена в НИЛ ВИЭ МГУ) в биотопливо технологиями пиролиза и гидротермального сжижения. Технологии НТЛ и пиролиз проводились на экспериментальных установках ОИВТ РАН (НТЛ при температурах 270, 300 и 330 °С; пиролиз при температуре 600°С с линейной скоростью нагрева 10°С/мин).

В результате пиролиза биомассы МКВ были получены следующие продукты:

- бионефть (пиролизная жидкость) – 21,9 % от исходной массы;
- неконденсируемые пиролизные газы – масса 1,15 л. Удельный объемный выход газа (количество газа, выделяющегося из 1 кг исходного материала) составил 0,076 нм³/кг;
- биоуголь - масса твердого остатка 27,0% от исходной массы МКВ (с учетом технических потерь в реакторе 9,3 % от исходной массы МКВ);

В результате гидротермального сжижения биомассы МКВ были получены следующие продукты:

- выход бионефти конверсией биомассы НТЛ при температурах 270°С, 300°С и 330°С составил 34,6%, 38,8% и 45,7% соответственно,
- выход синтез-газа составил 12,7%, 14,8% и 17,5%, соответственно;
- выход биоугля составил 28,7%, 27,4% и 26,0%, соответственно.

2) Сравнительная оценка технологий пиролиза и гидротермального сжижения для получения энергетических продуктов из выращенной биомассы микроводорослей показал, что выход бионефти, полученной технологией НТЛ (38,8-45,7%), был существенно выше, чем технологией пиролиза (21,9%). При этом, выход биоугля при использовании обеих технологий был на высоком уровне – около 27%. Биоуголь, состоящий на 90% из углерода и являющийся геологически устойчивой его формой, можно рассматривать как еще одну альтернативную стратегию поглощения и последующего захоронения углерода.

3) Проведен анализ состава и удельного объемного выхода неконденсируемых пиролизных газов, образующихся в процессе пиролиза, в зависимости от температуры. Показано, что с ростом температуры возрастает доля высококалорийных компонентов газовой смеси (водорода, метана и монооксида углерода). Проведена оценка теплотворной способности смеси этих газов: при росте температуры до 600 °С суммарная доля горючих составляющих в общем объеме неконденсируемых газов увеличивается до 73 %, возрастает калорийность газовой смеси (низшая теплотворная способность неконденсируемых пиролизных газов, образовавшихся при T = 400 °С, составил а 1,8 МДж/нм³ , при T = 500 °С – 5,15 МДж/нм³ , а при T = 600 °С – 15,3 МДж/нм³).

Список литературы

1. Equinor, Shell и Total инвестируют в первый крупномасштабный проект хранения CO₂ // Журнал С.О.К. 19 мая 2020. Электронный ресурс: https://www.c-o-k.ru/market_news/equinor-shell-i-total-investiruyut-v-pervyy-kрупномasshtabnyy-proekt-hraneniya-so2?utm_source=email&utm_medium=email&utm_campaign=1275&utm_term=36537766.
Дата обращения: 21.04.2021
2. Череповицын А.Е., Сидорова К.И., Смирнова Н.В. Целесообразность применения технологий секвестрации CO₂ в России // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал, 2013. №5. С.459 - 473. Электронный ресурс: http://ogbus.Ru/files/ogbus/authors/cherepovitsynaе/cherepovitsynaе_1.Pdf. Дата обращения: 23.04.2021
3. Zhu XG. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? / Zhu XG, Long SP, Ort DR. // *Curr Opin Biotechnol* 2008; 19:153–9.
4. Чернова Н. И., Киселева С. В., Власкин М. С., Григоренко А. В. Интегрированные системы использования микроводорослей для очистки сточных вод и получения биотоплива // Материалы V Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий», 2019. - Майкоп: Изд-во И.П. Кучеренко В.О. — Т. 2. - С. 247–258.
5. Zarrouk, C. Contribution a l'etude d' une cyanophycee / C. Zarrouk. – Influence de diverse facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthese de *Spirulina maxima* (Setch et Gardner) Geitler: University of Paris, France, 1966.
6. Dawson, R.M.C. Data for Biochemical Research (Third Edition) / R.M.C. Dawson [et al.]. – Oxford: Oxford Science Publications, 1986.
7. Folch, J. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues / J. Folch, M. Lees, G.H.S. Stanley // *J. Biol. Chem.* – 1957. – Vol. 226. – No. 1. – P. 497–509.
8. Dubois, M. Colorimetric method for determination of sugars and related substances / M. Dubois // *Anal. Chem.* – 1956. – Vol. 28. – No. 3. – P. 350–356.
9. Chernova N. Hydrothermal liquefaction of microalgae for biofuel production: the recycling of nutrients from an aqueous solution after HTL / Chernova N., Kiseleva S., V. Mikhail et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* — 2019. — no. 564. — P. 012101–1–012101–6.

ПРИМЕНЕНИЕ ОТКРЫТЫХ ГИС-ИНСТРУМЕНТОВ К РАЗРАБОТКЕ КАРТ РЕСУРСОВ И ДОСТУПНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ И ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В.П. Шакурн, Ю.Ю. Рафикова, С.В. Киселева

a-wee@yandex.ru

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

географический факультет, Россия, г. Москва

***Аннотация.** Технологии геоинформатики в последние десятилетия широко используются в области возобновляемой энергетики. Тематика печатных и электронных карт и атласов постоянно расширяется. В последние годы – в связи с развитием возобновляемой энергетики за рубежом и в России – помимо анализа ресурсной базы, все более востребованными становятся исследования пригодности территории для размещения объектов на возобновляемых источниках энергии. В статье представлена методика картографического представления и многофакторного анализа территории для выделения доступных площадок для размещения солнечных и ветровых станций с использованием открытого программного обеспечения.*

***Ключевые слова.** Геоинформационные системы, возобновляемая энергетика, размещение объектов, многофакторный анализ территории.*

Введение

Технологии геоинформатики в последние десятилетия широко используются в области возобновляемой энергетики. При этом областями применения методов картографии и ГИС-технологий (ГИС – геоинформационная система) стали не только ресурсы солнечной, ветровой, геотермальной и иных видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ), но и оценка (часто он-лайн) производительности установок и станций на ВИЭ, а также выбор наиболее оптимальных площадок для размещения станций. Соответственно, результатом первой группы исследований являются карты и атласы (ранее – печатные, в настоящее время интерактивные) и геоинформационные системы. Второе направление в качестве конечного продукта представляет электронные карты (обычно регионального масштаба) с характеристиками производительности станций или установок и комплексные карты, отражающие различные факторы, влияющие на выбор площадок для станций на ВИЭ.

До недавнего времени это направление использования ГИС-технологий было представлено в основном исключительно зарубежными продуктами. Широко используемыми стали ГИС-проекты глобального охвата, такие как Global Atlas for Renewable energy Международного агентства по возобновляемой энергетике IRENA, Global solar atlas, Global wind atlas (оба созданы под эгидой и спонсорством Мирового банка), Атласы Лаборатории возобновляемой энергетики США (NREL USA) и другие.

В качестве одного из первых ГИС-продукта в области возобновляемой энергетики следует указать ГИС ВИЭ РФ [<https://gisre.ru/>], созданный в

содружестве научно-исследовательской лабораторией возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ и лабораторией возобновляемых источников энергии Объединенного института высоких температур РАН. ГИС содержит интерактивные карты, которые отражают потенциалы солнечной и ветровой энергии на территории России (источник исходной информации – база данных NASA POWER) – как валовые (природные), так и технические (производительность ветровых и солнечных станций в привязке к географической сетке 1x1°), объекты возобновляемой энергетики (автономные и сетевые), а также иную информацию по теме. В то же время ГИС – в силу ее масштаба – не ставит задачу отражения региональных особенностей территории, а именно, тех факторов, которые определяют возможность сооружения и эксплуатации объектов возобновляемой энергетики. Такие задачи могут быть решены путем создания интерактивных карт регионального масштаба с использованием современных инструментов геоинформатики. Развитие методик и подходов создания таких геоинформационных продуктов, в первую очередь на основе открытых программных продуктов, является актуальной задачей для продвижения отечественной возобновляемой энергетики.

1. Факторы, определяющие возможность сооружения объектов возобновляемой энергетики

В научной литературе выделяют следующие типы факторов, определяющих возможности сооружения объектов возобновляемой энергетики (конкретно – солнечной и ветровой энергетики) на заданной территории: природные (ресурсы ВИЭ), экологические, технические, экономические и социальные (примерный перечень факторов приведен в таблице 1). После их группировки и составления серии карт возможен анализ территории и определение наиболее перспективных площадок для проектирования объектов на ВИЭ.

Соответственно, при анализе территории следует создавать карты, содержащие следующие факторы:

- 1) особо охраняемые территории (в том числе, ключевые орнитологические территории, лесной фонд, земли обороны и безопасности, территории памятников природы и культуры);
- 2) земельные ресурсы;
- 3) население (число, плотность, динамика);
- 4) опасные природные явления;
- 5) транспортно-дорожная сеть;
- 6) генерирующие объекты традиционной энергетики и возобновляемой энергетики;
- 7) энергопотребление.

В результате объединения этих карт с картой ресурсов солнечной, ветровой или иных видов ВИЭ будет получена итоговая карта районирования территории по степени пригодности для сооружения объектов возобновляемой энергетики. Очевидно, что тематика карт факторов может

изменяться и дополняться в зависимости от физико-географических, социальных, экономических особенностей региона.

Таблица 1

Типы и примеры факторов, влияющих на размещение объектов на ВИЭ – (составлено на основе Ресурсы возобновляемой энергетики: методы оценки и картографирование/ С.В. Киселева, Ю.Ю. Рафикова, Т.И. Андреевко и др. - М., 2019. - 194 с.)

№ п/п	Типы факторов	Примеры факторов
1	Природные	Рельеф Гидрографическая сеть Опасные геологические процессы
2	Экологические	Особо охраняемые природные территории Ключевые орнитологические территории Памятники культуры Территории сельскохозяйственных земель
3	Технические	Характеристики установок на ВИЭ Наличие производственно базы для строительства станций
4	Экономические	Наличие/удаленность дорожной сети Наличие/удаленность линии электропередачи Себестоимость произведенной от ВИЭ электроэнергии
5	Социальные	Наличие потенциальных Потребителей Наличие научной базы и специалистов Платежеспособный спрос населения

2. Методика многофакторного анализа территории для определения возможности размещения солнечных и ветряных энергоустановок

Для проведения многофакторного анализа территории удобно использовать слои векторных данных из OpenStreetMap (OSM). OSM - это глобальная база свободно доступных базовых картографических данных. В России готовые наборы векторных данных в различных форматах предоставляет компания NextGIS. Исходные данные для оценки ресурсов ветровой и солнечной энергии могут быть получены как из современных реанализов (падающая солнечная радиация, скорость ветра на различных высотах, температура воздуха и др.), так и из специализированных (для целей возобновляемой энергетики) открытых баз данных, например, NASA POWER. В качестве доступного инструмента для обработки и проведения территориального анализа возможно использование свободно распространяемого программного обеспечения QGIS с набором аналитических модулей GDAL.

Для анализа можно использовать как векторный, так и растровый формат данных, однако векторный формат больше подходит для бинарного разделения территорий на подходящие и не подходящие участки, без рейтинга градаций. Поэтому предпочтительно использовать растровый формат, который позволяет ранжировать территории по степени пригодности. Он также позволяет легко комбинировать любое количество входных слоев и гибко менять параметры оценки.

Таким образом, избрав для анализа растровый формат, необходимо привести к нему все входные данные. Иногда в наборах OSM некоторые объекты представлены отдельными слоями – например: линейные (реки) и полигональные (озера, пруды и т.п.), которые перед обработкой удобно объединять. Данные OSM преимущественно находятся в векторном формате, поэтому их нужно предварительно растрезировать, и для корректной обработки результатов следует учитывать систему координат и единицы измерения входных данных. Растрезирование происходит с введением параметра наличия того или иного фактора принимаемым за единицу, в случае отсутствия пикселю присваивается значение фактора «ноль».

Полученные растрезированные слои, содержащие необходимые для анализа данные о факторах, оценки можно подвергнуть дальнейшим различным преобразованиям, например, построить на их основе растры близости, используя эвклидово расстояние между точками. С помощью этого преобразования, в каждый пиксель в выходном растре с соответствующими исходным координатами, будет записано значение расстояния до ближайшего пикселя во входном растре, попадающего в окрестность заданного радиуса. Полученный растр можно затем использовать для определения подходящих областей, находящихся на определенном расстоянии от каких либо объектов, например, расстояния от некоторой точки (с максимальным солнечным или ветровым ресурсом) от дорог.

Далее, используя полученные растры в анализе, необходимо провести их наложение. Для этого необходимо переклассифицировать их, чтобы создать дискретные значения и задать нормировку. Весь диапазон значений каждого растра разбивается на несколько интервалов, число которых выбирается, исходя из конкретной задачи, и обуславливается количеством градаций итогового рейтинга. В зависимости от того, насколько важен тот или иной критерий (например, близость какого-либо объекта) мы придаем каждому из интервалов растра, содержащего данные об этом критерии, некоторый балл – высокий, если его приоритет над остальными критериями высок, низкий, если низок. После завершения процесса переклассификации растров они будут иметь только несколько типов значений указывающих на относительную пригодность пикселей в отношении, например, расстояния от заданных объектов. Если важна не близость объектов, а удаленность схема будет обратной, где пиксели, находящиеся дальше, будут иметь более высокий балл. Такая ситуация складывается если, например, требуется учесть водоохранную зону, когда удаленность от водного объекта является преимуществом при выборе оптимальных территорий для размещения объектов на ВИЭ.

На заключительном этапе пространственного анализа требуется провести наложение растров уже содержащих в себе нужные критерии в виде дискретных значений, которые перемножаются или складываются в зависимости от типа взаимодействия критериев. В качестве примера можно рассмотреть следующие критерии определения пригодности площадки: близость к дорогам, удаленность от водных объектов, отсутствие на рассматриваемом участке особо охраняемых природных территорий. В этом

случае необходимо суммировать значения факторов дорог и водных объектов, а в случае, если некоторые точки заданного участка попадают на территорию ООПТ, сумма значений всех слоёв в этой точке умножается на 0. Если строгих ограничений (таких, как ООПТ) нет, – умножается на 1. В этом примере придается равное значение близости дороги и водных объектов. В реальной жизни в каждой точке могут присутствовать несколько критериев разной важности. Можно смоделировать это, умножив значения в растрах на соответствующие веса. Например, если близость к дорогам вдвое важнее, чем близость от водных объектов, то нужно умножить значения соответствующего растра на 2. Для того, чтобы представить полученное ранжирование территории в четких границах, можно использовать изолинии, а так же рассчитать площадь заключенных между ними полигонов, тем самым определить размер территорий с разной категорией пригодности для размещения энергоустановок (станции) на ВИЭ, а также использовать другой статистический инструментарий.

3. Результаты и обсуждение

В качестве примера реализации изложенной выше методики для размещения объектов генерации электроэнергии с использованием ВИЭ, можно привести карту (рис. 1) мест, доступных для установки солнечных и ветровых энергообъектов на территории Республики Крым.

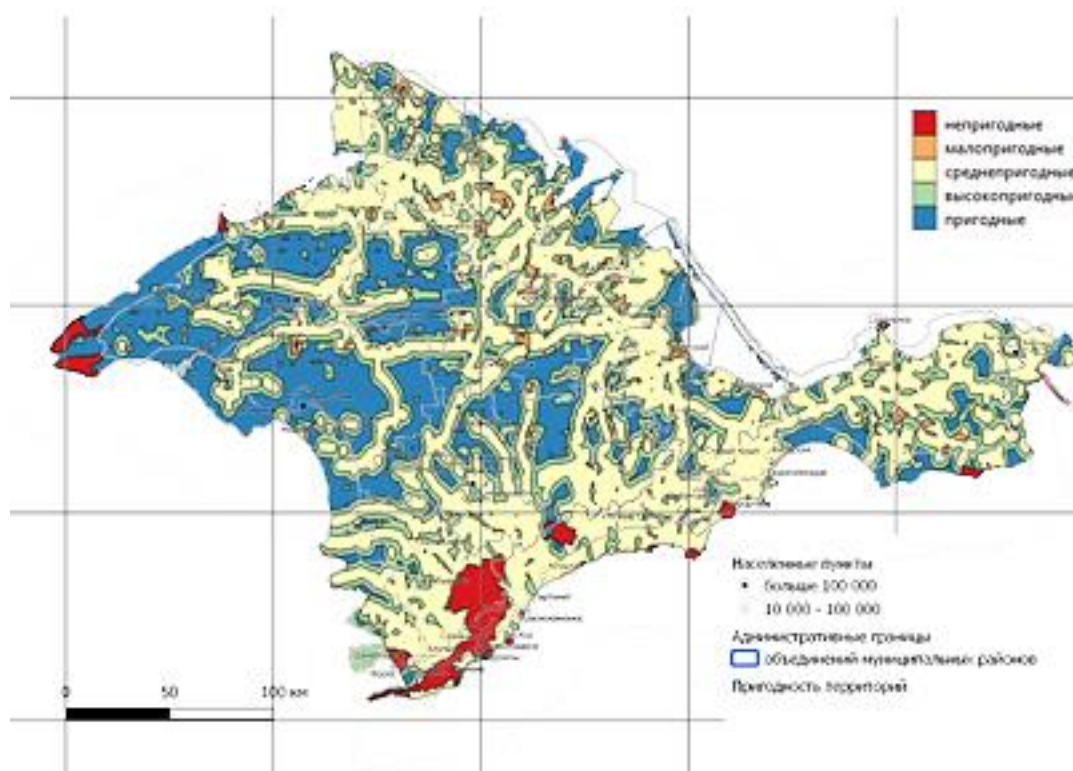


Рис. 1. Карта мест доступных для установки солнечных и ветровых энергообъектов на территории Республики Крым

Она была построена для демонстрации влияния таких факторов как близость дорог, удаленность от водоохраной зоны и зон ООПТ. Факторы, присутствующие в этом рассмотрении взяты из общих соображений, однако

существует множество других факторов специфичных для каждой конкретной территории. Для наглядности и простоты в данной реализации весовое влияние факторов принималось как равное, однако при более глубоких изысканиях вес каждого должен рассчитываться на основе детального анализа вклада в общую картину. Стоит учесть, что данный пример лишь показывает удобство такого рода методики при оценке пригодности территорий, на практике же подбор ограничивающих факторов является отдельной, требующей специальных компетенций задачей.

По результатам применения методики выявлены области в центральной и западной частях полуострова наиболее подходящие (в первом приближении) для размещения энергообъектов на ВИЭ. В довершение отметим, что для малой и микрогенерации такое зонирование не столь важно, а имеет значение для относительно крупных станций, требующих больших площадей.

Заключение

В настоящее время актуальным становится не только разработка карт и атласов, отражающих природные и технические потенциалы различных видов возобновляемых источников энергии, но и многофакторный анализ территории для определения наиболее оптимальных площадок для размещения объектов возобновляемой энергетики. В статье изложена методика и приведен пример ее практической реализации на основе открытого картографического программного обеспечения QGIS, позволяющая решать подобные задачи.

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ПРИЗЕМНОГО СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА В АРКТИКЕ: НАБЛЮДЕНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Ю.А. Штабкин, К.Б. Моисеенко, А.И. Скороход

yuryshtabkin@gmail.com

Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Россия, г. Москва

Аннотация. Проведены подробные количественные оценки влияния антропогенных эмиссий в Северной Евразии на сезонные вариации приземного содержания метана в Арктике и Субарктике. Количественная оценка антропогенного сигнала в измеренных концентрациях CH_4 проведена с использованием глобальной химико-транспортной модели GEOS-Chem с учётом всех основных источников и стоков данного соединения. Полученные результаты позволяют сделать вывод о значимой роли региональных источников антропогенных выбросов метана в Западной Европе, на Европейской территории России и в Сибири в региональном балансе приземного содержания CH_4 в нижней тропосфере.

Ключевые слова. Метан, Арктика, численное моделирование, загрязнение атмосферы, дальний перенос, модель GEOS-Chem.

1. Введение

Метан (CH_4) является вторым по значимости (после диоксида углерода, CO_2) парниковым газом в атмосфере, согласно четвертому обобщающему докладу, опубликованному в 2007 г. Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCCAR4) [1]. Для региона Северной Евразии, ограниченность данных по содержанию метана в приземном воздухе затрудняет проведение количественных оценок эмиссий метана от важнейших региональных антропогенных и биогенных источников. Частично указанный пробел восполняется данными долгосрочных наблюдений на станциях Териберка (69.1 с.ш., 35.1 в.д., 15 м. над уровнем моря (далее - н.у.м.)), Белосток (53.1 с.ш., 23.1 в.д., 160 м.н.у.м.), Зотино (60.8 с.ш., 89.4 в.д., 300 м.н.у.м.) и Тикси (71.4 с.ш., 128.5 в.д., 10 м.н.у.м.) предварительный анализ которых приводится ниже. Начиная с 2005 года, по данным на всех выше перечисленных станциях наблюдается заметный рост приземной концентрации метана (см. рис. 1). Причины указанного роста остаются до конца не выяснены. Ниже приводятся количественные оценки возможного вклада важнейших региональных источников эмиссий метана в наблюдаемую долгосрочную изменчивость содержания метана в приземном воздухе. Надежные и детальные количественные оценки мощности источников и стоков атмосферного метана необходимы как для интерпретации наблюдаемой изменчивости, так и для прогноза будущих изменений.

Для анализа вариаций приземного содержания метана используются данные наблюдений на фоновых станциях мониторинга состава атмосферного воздуха, а также численные расчеты, проводимые с помощью транспортно-химических моделей (ТХМ), причем для оценки влияния разных источников метана могут использоваться методы как прямого, так и обратного

моделирования. Для прямого моделирования в данной работе использовалась транспортно-химическая модель (ТХМ) GEOS-Chem (Goddard Earth Observing System chemical model, веб-сайт поддержки <http://acmg.seas.harvard.edu/geos/>) [2], широко используемая в международном сообществе для расчетов полей химически активных и парниковых газов в атмосфере.

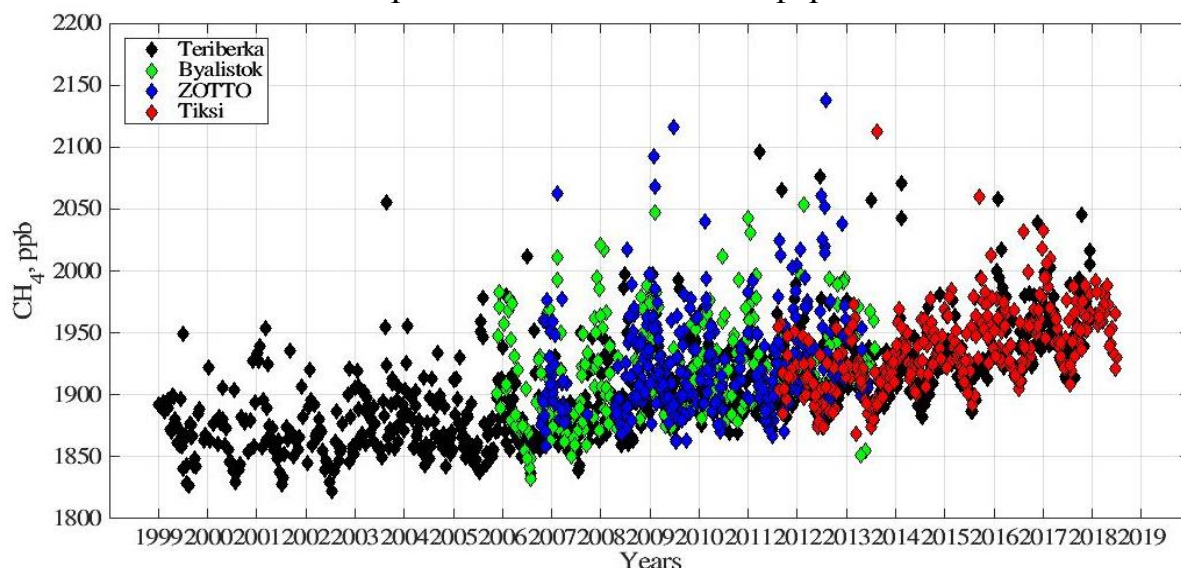


Рис. 1. Приземная концентрация метана по данным фляговых измерений на станциях Териберка, Белосток, ZOTTO и Тикси

2. Сравнение с моделью результатов наблюдений на арктических и субарктических станциях

Для сравнения с данными наблюдений на арктических и субарктических фоновых станциях мониторинга состава атмосферы (см. рис. 2) использовалась результаты расчетов с ТХМ GEOS-Chem 12–01 на сетке с горизонтальным разрешением $4^\circ \times 5^\circ$. Расчеты проводились за период 2007 – 2019 гг, соответствующий временным рядам используемых данных, с использованием данных реанализа MERRA2. Для задания биогенных эмиссий метана использовалась встроенная модель WetCHARTs v1.0 [3], для задания антропогенных эмиссий применялись данные EDGAR 4.3.2 [4], для задания эмиссий от природных пожаров – GFED4 [5].

В качестве критериев согласованности использовались среднее смещение $\delta = \bar{O} - \bar{C}$, среднеквадратическая ошибка $RMSE = \left(\overline{(O - C)^2} \right)^{1/2}$ и коэффициент корреляции $COR = \overline{(O - \bar{O})(C - \bar{C})} / (\sigma_O \sigma_C)$, где O и C – наблюдаемые и рассчитанные по модели среднемесячные концентрации CH_4 , σ_O , σ_C – соответствующие стандартные отклонения, верхняя черта означает усреднение по всем значениям из ансамбля. Все представленные ниже результаты получены на основе анализа среднемесячных значений. На рисунках 3 – 5 приведены соответствующие статистики по месяцам: $P_{10,90}$ – перцентили, \square – среднее. Сплошная линия – расчет по модели GEOS-Chem (среднемесячные концентрации, вывод на первом модельном уровне, ~ 58 м над землей).

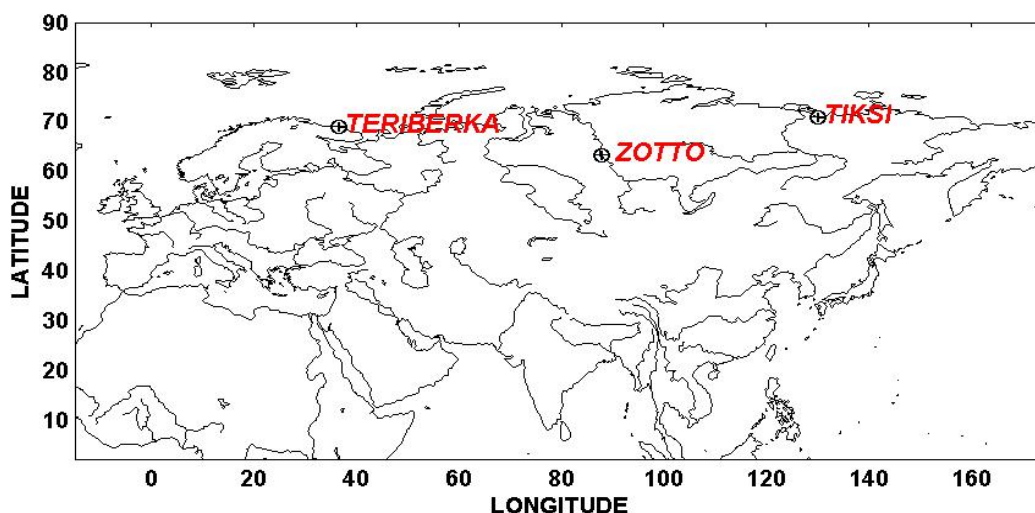


Рис. 2. Станции мониторинга состава атмосферы, используемые для сравнения с моделью GEOS-Chem

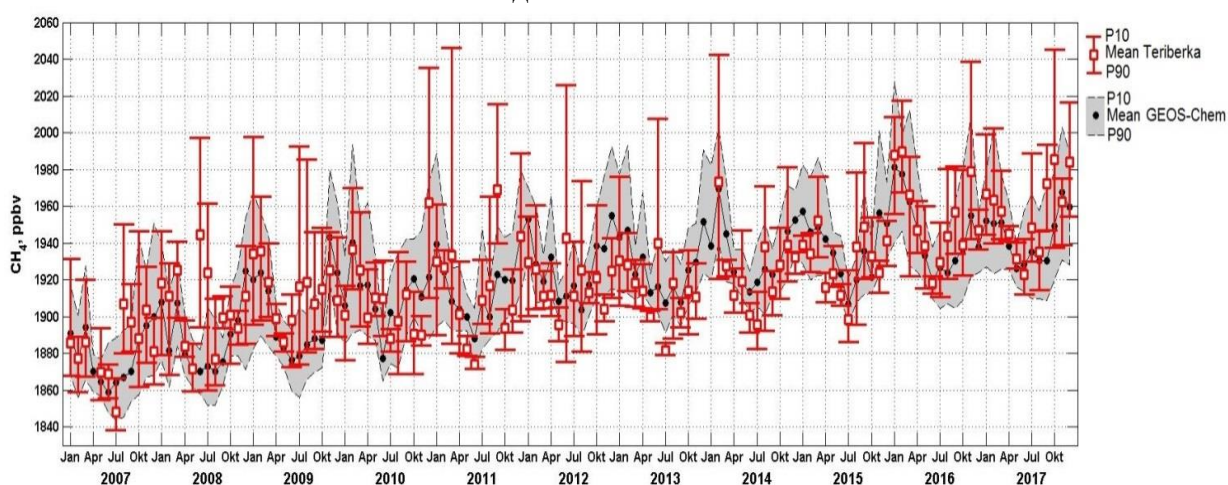


Рис. 3. Сравнение расчетов GEOS-Chem с наблюдениями приземной концентрации метана на станции Териберка

Для станции Териберка (рис. 3) получено $COR = 0.75$ (0.65 .. 0.82), $RMSE = 19.1$ (16.9 .. 22.7) ppb и $\delta = 2.2$ (-1.0 .. 5.6) ppb. Указанные в скобках значения соответствуют границам 95% доверительного интервала, рассчитанного методом бутстрепа [6]. Необходимо отметить, что значения P10 и P90 для станции рассчитаны на основе данных флаговых (flask) измерений, которые проводились 2 – 10 раз в месяц.

Для станции Тикси (рис. 4) получено $COR = 0.61$ (0.44 .. 0.74), $RMSE = 22.1$ (18.8 .. 26.3) ppb и $\delta = 5.1$ (0.5 .. 10.0) ppb.

Для станции ZOTTO (рис. 5) получено $COR = 0.70$ (0.39 .. 0.84), $RMSE = 23.9$ (18.8 .. 32.1) ppb и $\delta = -9.6$ (-16.1 .. -1.8) ppb. Высокие значения приземной концентрации метана летом 2012 года, вероятнее всего, обусловлены интенсивными природными пожарами в районе станции.

В целом, основываясь на среднемесячных величинах, результаты расчетов для всех трех станций неплохо согласуются с данными наблюдений, учитывая ограниченное пространственное разрешение модели. Наилучшее согласование наблюдается для станции Териберка, наихудшее – для станции Тикси. Систематическое отклонение рассчитанных моделью величин

концентраций метана от наблюдаемых в отдельные сезоны связано с невозможностью корректного воспроизведения высокочастотных (синоптических) вариаций поля CH_4 , дающих ощутимый вклад в общую изменчивость CH_4 . Другой причиной может являться недостаточная точность используемых данных об эмиссиях, особенно на территории России. Учитывая важную роль природных пожаров в умеренных и высоких широтах Северной Евразии, как источника поступления в атмосферу большого количества химически активных газов, в т.ч. и метана, большую роль в наблюдаемых расхождениях между модельными расчетами и наблюдениями могут играть неопределенности в расчетах эмиссий продуктов горения. Кроме того, возможен значительный вклад синоптической компоненты общей вариации метана в суммарный измеряемый сигнал.

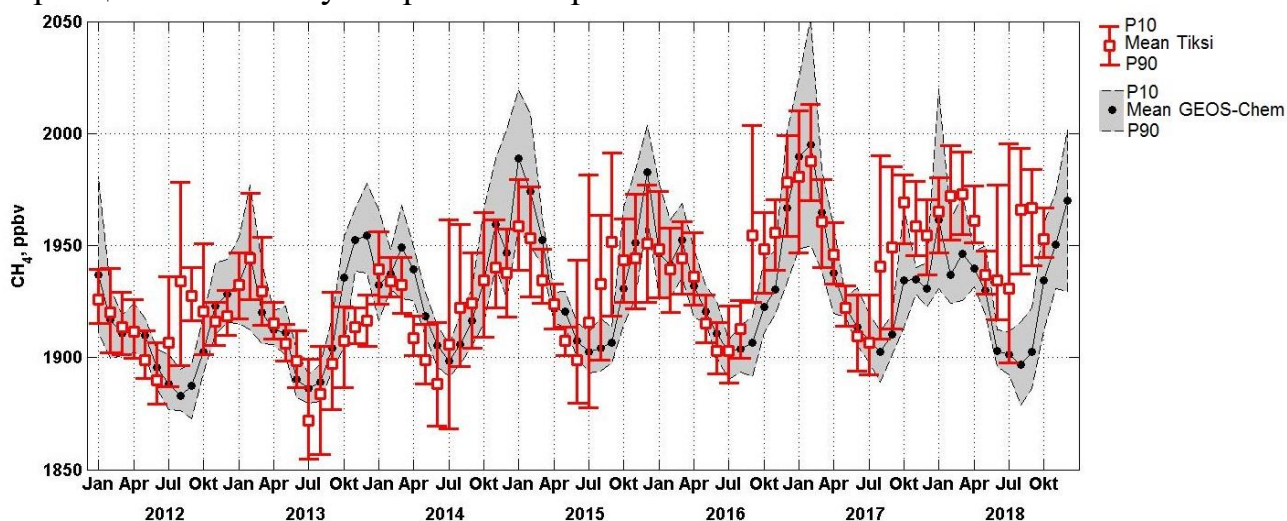


Рис. 4. Сравнение расчетов GEOS-Chem с наблюдениями приземной концентрации метана на станции Тикси

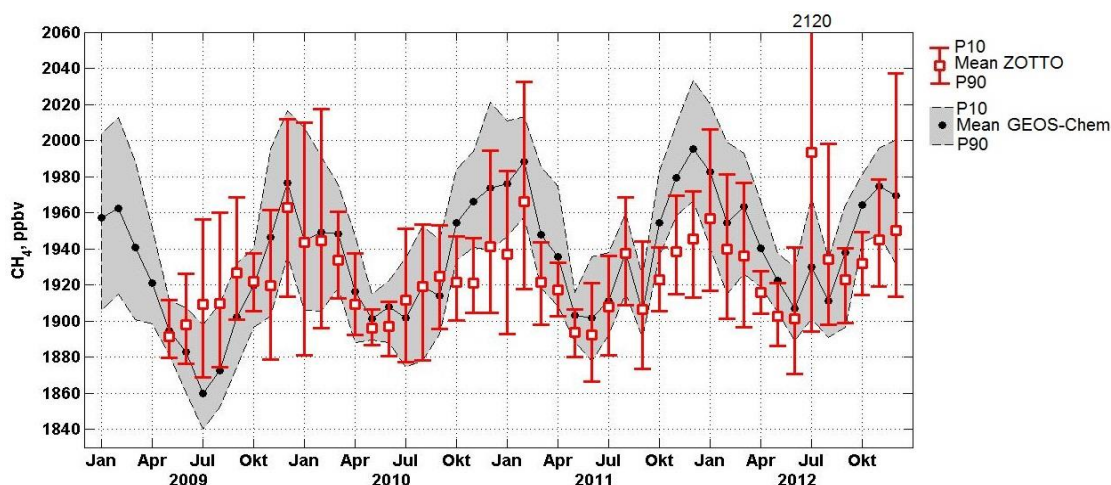


Рис. 5. Сравнение расчетов GEOS-Chem с наблюдениями приземной концентрации метана на станции ZOTTO

3. Модельный эксперимент

Количественные оценки вклада антропогенных эмиссий в атмосферное поле концентрации CH_4 были выполнены на основе регионального подхода, при этом определен один макрорегион, включающий западную Европу,

европейскую территорию России (ЕТР), Сибирь и российский Дальний Восток

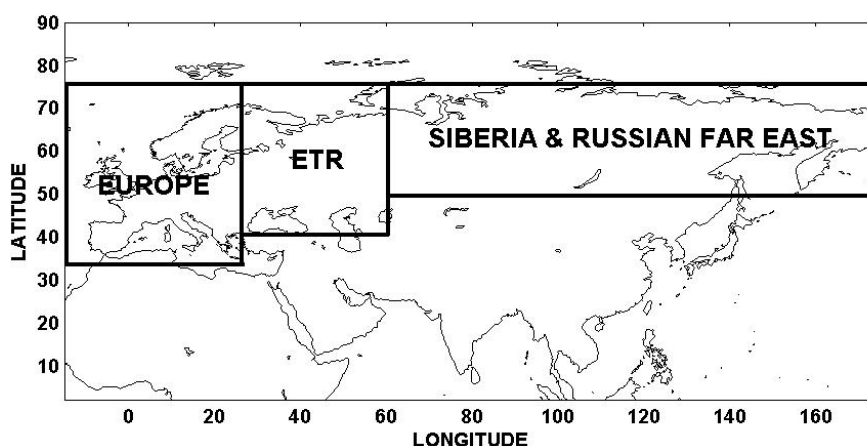


Рис. 6. Географические районы, выбранные для анализа приземного поля озона: Западная Европа (ЗЕ) (35–75 N, -15–27E), Европейская территория России (ЕТР) (41–75 N, 27–60 E), Сибирь (СИБ) и российский Дальний Восток (49–75 N, 60–180 E)

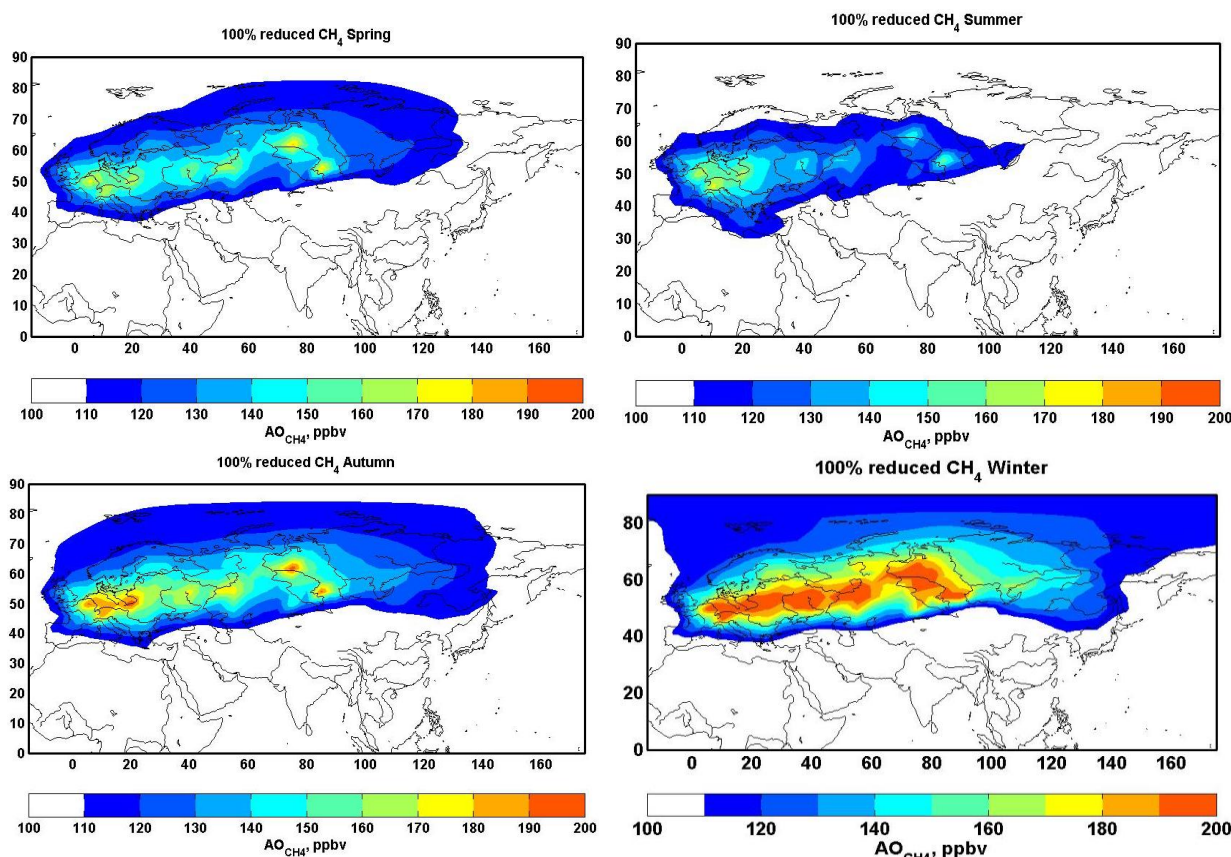


Рис. 7. АО на антропогенные эмиссии CH_4 для разных сезонов. Средние значения за 2007 – 2018 гг.

Для любой географической точки атмосферный отклик (далее – АО) на суммарные антропогенные эмиссии метана от конкретного региона рассчитывается как разность между концентрацией $\chi(\text{CH}_4)_0$ (ppb), полученной из базового модельного расчёта, в котором учитываются все планетарные эмиссии, и концентрацией, рассчитанной из модели при выключении антропогенных эмиссий в данном регионе, $\chi(\text{CH}_4)$:

Таким образом, были рассчитаны среднесезонные поля откликов за – 2018 гг. на первом модельном уровне (~ 58 м от поверхности). Расчеты по Chem проводились за период с 1 июля 2006 г. от исходного startup-файла модели с глобальными полями концентраций, игравшими роль начальных условий, по 31 декабря 2018 г., при этом первые 6 месяцев использовались для разгона модели (адаптации полей атмосферных концентраций к редуцированным полям эмиссий) и из дальнейшего анализа исключались. Рассчитанные поля АО для выбранных регионов за отдельные сезоны приведены на рис. 7.

4. Результаты расчетов

Средние за рассматриваемые годы величины АО для трех рассмотренных ранее станций приведены в табл. 1 и построенной на её основе сводной диаграмме на рис. 8.

Таблица 1

Среднесезонные значения приземной концентрации метана в районе наблюдательных станций Териберка, Тикси и ZOTTO (ppb). Среднесезонные значения атмосферного отклика на антропогенные эмиссии метана для обозначенных станций (ppb)

	Териберка		Тикси		ZOTTO	
	Среднее	АО	Среднее	АО	Среднее	АО
Зима	1934	129	1948	126	1948	165
Весна	1914	114	1927	111	1911	131
Лето	1912	104	1912	99	1917	110
Осень	1922	120	1939	115	1925	139

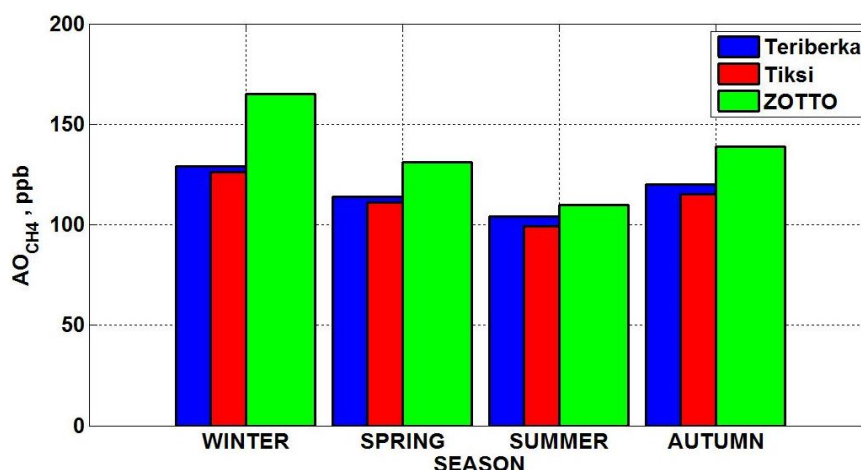


Рис. 8. Сводная диаграмма величин AO_{CH_4} для станций Териберка, Тикси и ZOTTO. Приведены средние значения для всех сезонов 2007 – 2018 годов

В целом, влияние дальнего переноса от регионов климатически значимых эмиссий CH_4 в Северной Евразии на содержание метана в нижней тропосфере и величину АО (см. рис. 7) проявляется наиболее сильно в зимний период, что обусловлено сразу несколькими факторами: сезонным увеличением эмиссий при сжигании ископаемого топлива, увеличением фотохимического времени жизни метана в атмосфере за счет уменьшения

содержания гидроксила, а также увеличением времени пребывания атмосферных трассеров в нижней тропосфере в связи с уменьшением роли конвективного переноса и более высокой статической устойчивостью тропосферы в целом [7]. По результатам расчетов, величина АО в зимний период может достигать 7–10% от наблюдаемой концентрации метана.

Наибольшие значения АО (до 165 ppb зимой) на антропогенные эмиссии метана во все сезоны достигается для ZOTTO. На протяжении большей части года район станции находится в зоне отчетливо выраженного влияния источников атмосферного загрязнения в Западной Европе, на ЕТР и юге Сибири. Связанный с этими источниками континентальный подветренный шлейф формирует область повышенных концентраций загрязняющих соединений, включая CH_4 , распространяющуюся практически на всю Северную Евразию. Расположенные на арктическом побережье станции находятся на дальней периферии этого шлейфа, поэтому антропогенное влияние на них еще меньше. Значения АО для Териберки лишь немного (на 3 – 5 ppb) выше, чем для Тикси, находящейся намного восточнее.

5. Заключение

Проведена оценка компонентов бюджета атмосферного метана в Арктике с применением методов прямого и обратного моделирования.

На основе глобальной транспортно-химической модели GEOS-Chem проведена количественная оценка вкладов климатически значимых природных и антропогенных источников эмиссий в Северной Евразии в наблюдаемую сезонную изменчивость CH_4 на Кольском полуострове (станция Териберка), в Центральной Сибири (высотная мачта ZOTTO) и Северо-востоке Евразии (Тикси), по данным измерений в 1999–2019 гг. Согласно расчетам, величина вклада региональных эмиссий в измеренные концентрации метана составляет (~104–165 ppbv), или 5.5–8.6 % от среднегодовой величины 1926 ppbv по измерениям на трех указанных станциях. Рассчитанные величины атмосферного отклика в несколько раз превышают амплитуду наблюдаемой годовой изменчивости метана (22–36 ppbv), что позволяет сделать вывод о значимой роли региональных источников атмосферных выбросов метана в Западной Европе, на Европейской территории России и в Сибири в региональном балансе приземного содержания CH_4 в нижней тропосфере над континентом. В летние месяцы вклад региональных эмиссий метана выражен несколько слабее (105 ppbv) по сравнению с зимой (~140 ppb), что в первую очередь связано с возрастающей ролью вертикального конвективного обмена в нижних слоях тропосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту РФФ №20-17-00200.

Список литературы

1. Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, and R. Van Dorland Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, in Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z.

Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, pp. 129-234, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007

2. Bey I, Jacob D J, Yantosca R M, Logan J A, Field B, Fiore A M, Li Q, Liu H, Mickley L J and Schultz M 2001 Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation *J. Geophys. Res.* 106 23073-96

3. Bloom, A. A., Bowman, K. W., Lee, M., Turner, A. J., Schroeder, R., Worden, J. R., Weidner, R., McDonald, K. C., and Jacob, D. J. A global wetland methane emissions and uncertainty dataset for atmospheric chemical transport models (WetCHARTs version 1.0), *Geosci. Model Dev.*, 10, 2141–2156, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2141-2017>, 2017.

4. Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Dentener, F., Bergamaschi, P., Pagliari, V., Olivier, J. G. J., Peters, J. A. H. W., van Aardenne, J. A., Monni, S., Doering, U., Petrescu, A. M. R., Solazzo, E., and Oreggioni, G. D. EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970–2012, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 959–1002, <https://doi.org/10.5194/essd-11-959-2019>, 2019.

5. van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., Collatz G. J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., DeFries R. S., Jin Y., van Leeuwen T. T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009) // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 11707 11735. doi:10.5194/acp1011707 2010.

6. Hanna S.R. Confidence limits for air quality model evaluations, as estimated by bootstrap and jackknife resampling methods // *Atmospheric Environment*. 1989. № 23. P. 1385–1398.

7. Elansky N.F. Spatial and temporal variations of trace gases surface concentrations over Russia from TROICA observations // *Proceedings of the International Symposium on Atmospheric Physics and Chemistry*, May 15 – 19, 2007. Eds. Huijun Wang and G. S. Golitsyn, Beijing, 49–56.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ (ЦИКЛОНОВ И АНТИЦИКЛОНОВ) НА ТЕРРИТОРИИ АБХАЗИИ

^{1,2}Я.А. Экба, ¹Э.В. Пачулия

ekba-yan@yandex.ru; pashuliya-97@mail.ru

¹Абхазский государственный университет, Абхазия, г. Сухум

²Институт экологии Академии наук Абхазии, Абхазия, г. Сухум

Атмосфера является чрезвычайно подвижной средой, где постоянно формируются и разрушаются вихри различных размеров. Самые мелкие из них со скоростями ветра 100-200 м/с – торнадо (в Европе их называют тромбами), обладающие большой разрушительной силой, способные поднимать в воздух автомобили, вырывать из Земли с корнем вековые деревья, стирать с лица Земли поселения, имеют диаметр от 20 м до 1-2 км. Время их существования – от нескольких минут до нескольких часов. Наиболее крупные атмосферные вихри – внетропические циклоны и антициклоны, имеющие различные размеры и достигающие в диаметре нескольких тысяч километров [2, с. 70].

Характерной особенностью умеренных широт является разнообразие воздушных масс: арктических (антарктических), полярных (они господствующие), тропических, как морских, так и континентальных, смещающихся с запада на восток. В циклонах северного полушария эти вихри движутся по спирали против часовой стрелки, в южном - по часовой, но всегда направлены к центру циклона. Скорость ветра при этом всегда высокая. Так, в циклонах умеренных широт она достигает 20-30 м/с, т.е. штормовой и ураганной силы, а в тропических циклонах нередко превышает 60-70 м/с (рис. 1).

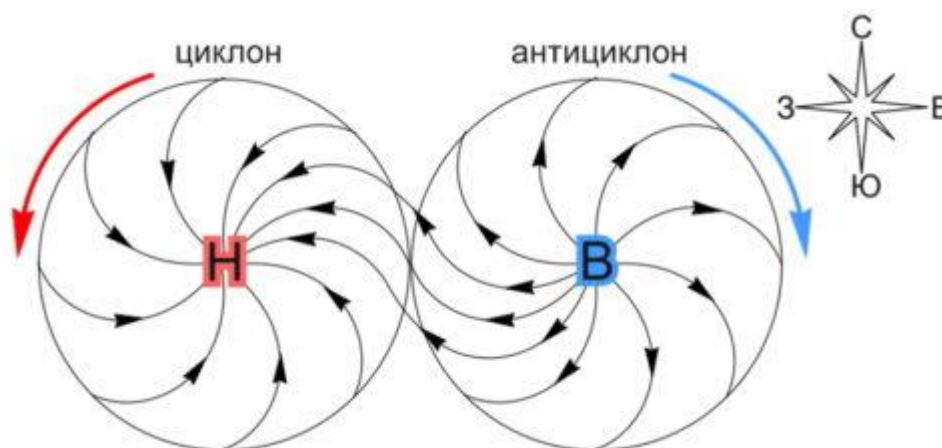


Рис. 1. Схема движения воздушных масс в циклонах и антициклонах

Погода в циклонах, особенно на линии теплого фронта, всегда пасмурная, облачная и прохладная, летом - дождливая, а зимой - снежная с оттепелями.

В циклонах и антициклонах воздух вращается в приземном слое на высоте 2-16 км. Если не учитывать грозовые фронты, то обычно воздух в циклонах и антициклонах вращается на высоте 2-10 км. Поэтому самолеты, которые летают на высоте 10 км, практически не замечают этого вращения. Средний размер циклона порядка тысячи километров в диаметре. Антициклоны обычно имеют средний размер в два - полтора раза больше. Следовательно, циклоны и антициклоны представляют собой плоские вихревые движения в атмосфере, так как их толщина на два порядка меньше диаметра (рис. 2).

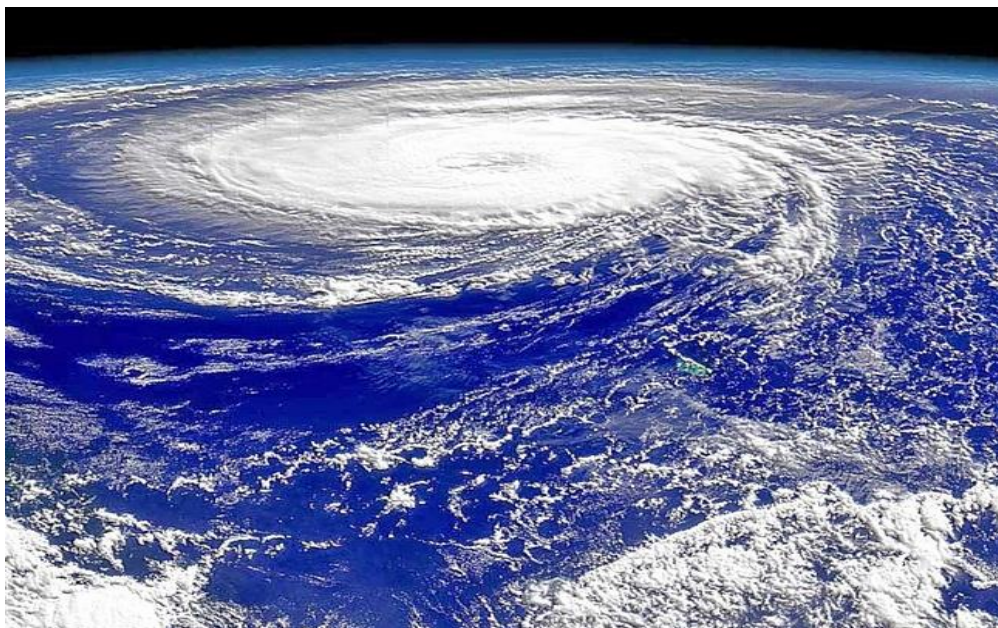


Рис. 2. Циклоны представляют собой огромный воздушный плоский диск с толщиной меньше одного процента от диаметра, вращающийся в горизонтальной плоскости около Земли. Фото циклона, сделанное из космоса

На вращение воздуха в циклонах и антициклонах влияние оказывает только горизонтальная проекция силы Кориолиса, которая равна $-2\rho v\Omega \sin(\varphi)$, где ρ – плотность воздуха, v – скорость воздуха, Ω – угловая скорость вращения Земли, φ – широта. Сила Кориолиса мала, так как $\Omega = 1/24$ часа. Эта величина имеет значение порядка 10^{-5} Гц.

Чтобы воздух вращался вокруг центра, на него должна действовать центробежная сила, которая будет задавать центробежное ускорение. Однако в антициклоне повышенное давление в центре, и объемная сила, индуцированная градиентом давления, будет направлена не к центру, а от центра антициклона.

Исходя из обычных представлений, антициклон не может существовать в принципе и должен «разлететься во все стороны». Однако на записях, сделанных из космоса, видно, что в антициклоне воздух вращается, также как и в циклоне, вокруг центра на расстоянии тысячи километров. В отличие от циклонов в антициклонах спиральные вихревые возмущения направлены от центра антициклона (рис. 3).

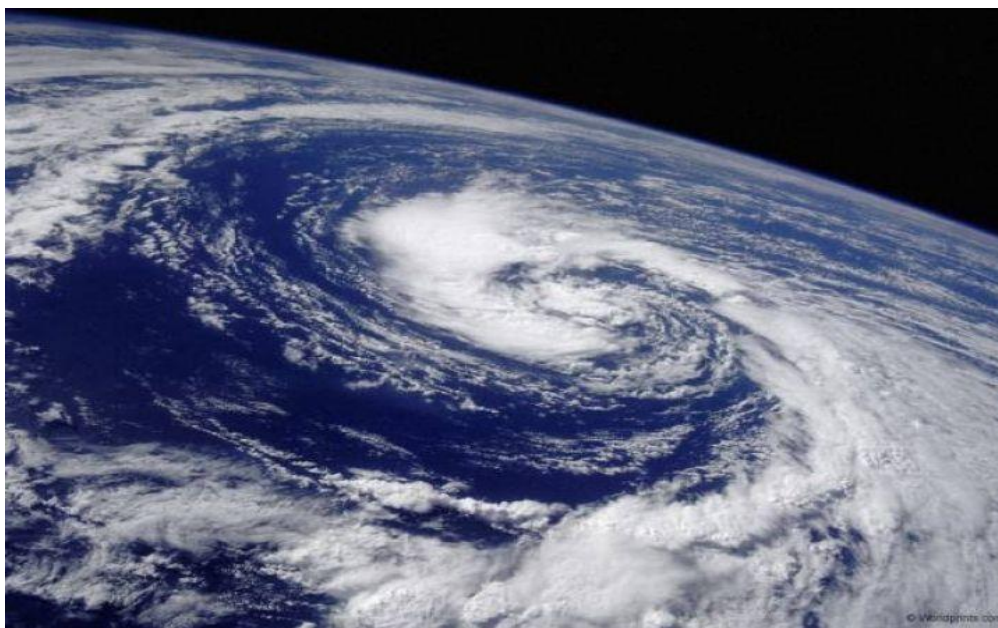


Рис. 3. Антициклон, как и циклон, вращается в горизонтальной плоскости вокруг центра с повышенным давлением. Фото антициклона, сделанное из космоса

Ветровые потоки в северном полушарии дуют по часовой стрелке, в южном - против часовой стрелки.

Погода в антициклоне обусловлена оседанием воздушных масс, их адиабатическим сжатием и как следствие повышением температуры воздуха. Поэтому летом она спокойная, характерна штилями и слабыми ветрами, а зимой погода ясная и морозная. Антициклоны достигают размера несколько тысяч километров в поперечнике. В центре антициклона давление обычно 1020-1030 мбар, но может достигать 1070-1080 мбар. Как и циклоны, антициклоны перемещаются в направлении общего переноса воздуха в тропосфере, то есть с запада на восток, отклоняясь при этом к низким широтам. Средняя скорость перемещения антициклона составляет около 30 км/ч в Северном полушарии и около 40 км/ч в Южном, но нередко антициклон надолго принимает малоподвижное состояние.

Основными признаками антициклонов являются:

- ясная или малооблачная погода, отсутствие ветра;
- отсутствие осадков, устойчивый характер погоды
- в летний период антициклон приносит жаркую малооблачную погоду, а в зимний период антициклон приносит сильные морозы;
- важной особенностью антициклонов является образование их на определённых участках.

Причиной движения воздуха в атмосфере является разница давления над земной поверхностью, что обусловлено неравномерностью распределения солнечной радиации и неоднородностью подстилающей поверхности.

Режим атмосферного давления в Абхазии обуславливается сочетанием макроциркуляционных условий, теплового баланса и особенностей рельефа. Для анализа связи режима давления с другими климатическими характеристиками обычно рассматривают давление воздуха, приведенное к уровню моря, поскольку оно является функцией высоты. Средние годовые

величины давления воздуха, приведенные к уровню моря, составляют 1015-1017мб. Его территориальное распределение характеризуется особенностями зимнего режима – относительно пониженное давление воздуха отмечается над прибрежными районами. Годовая амплитуда растет с увеличением континентальности климата. В прибрежных районах она близка к 8 мб. В годовом ходе отчетливо обнаруживаются сезонные особенности территориального распределения давления, наиболее резко выраженные зимой и летом (табл.1).

Таблица 1

Значение атмосферного давления (в мб) за 2010-2020 гг.												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
P_{cp}	1015	1014	1014	1012	1010	1007	1006	1007	1010	1014	1017	1017
P_{max}	1032	1033	1032	1030	1023	1018	1018	1017	1024	1042	1031	1035
P_{min}	989	990	988	991	992	990	991	994	993	991	996	988
$P_{max} - P_{min}$	43	43	44	39	31	28	27	23	31	51	35	47

В табл. 1 приведены по длиннорядным станциям наибольшие и наименьшие средние месячные величины давления воздуха. Их годовой ход типичен для климата прибрежных территорий с максимумом обычно в декабре-январе и минимумом повсеместно в июле. Наибольшие разности между предельными значениями среднего месячного давления воздуха отмечаются в холодный период года, а наименьшее – в теплый, когда на территории Абхазии преобладает без градиентное поле давления.

С наступлением зимы и весны в прибрежных и предгорных районах Абхазии отмечается последовательное понижение давления. Наибольшее понижение отмечается при переходе от марта к апрелю, а затем от сентября к ноябрю (рис. 4).

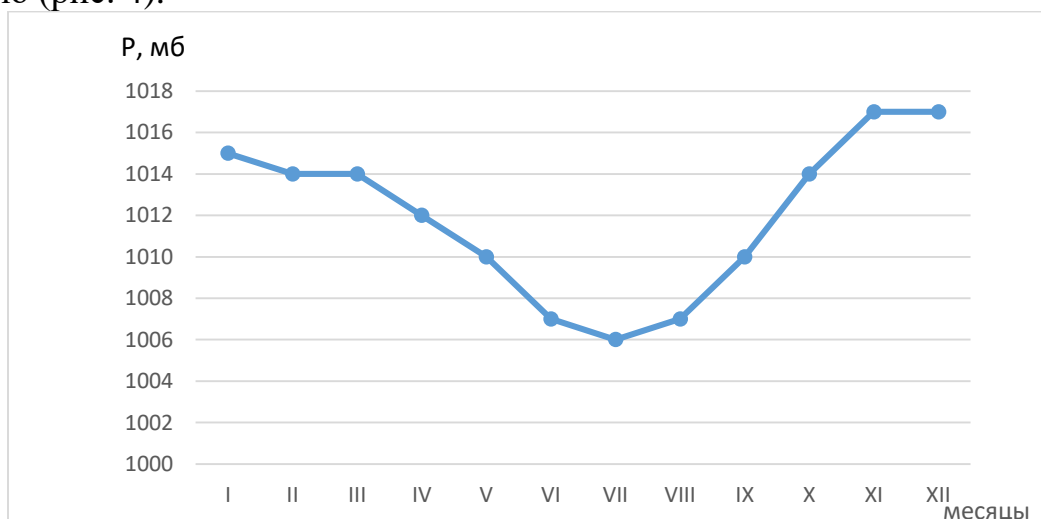


Рис. 4. Среднемесячные значения атмосферного давления (в мб) за 2010-2020 гг.

В зимний период давление более изменчиво, чем в летний. Это обуславливается сравнительно большой устойчивостью летнего термического режима. Если максимальная разность между наибольшими и наименьшими средними месячными величинами давления воздуха не превышает 11мб, то

разность между абсолютными значениями максимумов и минимумов давления может достигать 47-51 мб. Давление воздуха ото дня ко дню может резко меняться, особенно в приморской зоне. Здесь повторяемость междусуточной изменчивости давления более 9 мб составляет в январе 9,0-13,0%, в апреле несколько меньше, а в июле всего 0,3-1,3%. В суточном ходе давления по всей рассматриваемой территории отмечается два минимума и два максимума, время наступления которых меняется в зависимости от высоты места. В прибрежных и низменных районах Абхазии, а также в предгорьях первый максимум давления (основной) отмечается утром, между 8 и 10 час., второй – вечером, примерно между 22 и 23 час., первый минимум (более слабый) наблюдается ночью, около 4 – 5 час., второй (основной) – днем, приблизительно от 15 до 18 час., при этом в летние месяцы он приходится на 17 – 18 час., а в зимние – на 15 – 18 час. Суточная амплитуда в среднем составляет 0,5 – 1,0 мб.

Так как Абхазия находится под действием атмосферной циркуляции умеренных и субтропических широт, условия погоды здесь более неустойчивы чем в типичной субтропической зоне. Наибольшее значение для Закавказья имеют микропроцессы, находящиеся в значительной зависимости от положения и степени развития азиатского антициклона, с одной стороны, и положения, и активности полярного фронта, обуславливающего характер циклонической деятельности в средиземноморье, с другой.

Из аэрологических наблюдений известно, что в тех широтах, где расположена территория Абхазии, господствует западный перенос воздушных масс. В холодном сезоне наиболее повторяются здесь воздушные массы морского воздуха умеренных широт, реже с северо-запада бывают вторжение холодного континентального воздуха умеренных широт и арктического континентального воздуха. Проходя над теплой поверхностью Черного моря они согреваются и не вызывают на Кавказском побережье такого резкого похолодания. С юга и юго-востока зимой изредка входят тропические воздушные массы. В теплом сезоне господствующее положение занимает тропический морской и континентальный воздух, входящий сюда с юга и юго-запада и образующийся на побережье за счет прогрева и трансформации из воздуха умеренных широт.

Как показали исследования многих ученых в день, предшествующий вторжению холодного воздуха, обычно наблюдается теплая погода, часто с выпадением осадков. В день вторжения холодного воздуха отмечается понижение среднесуточной температуры на 5-7°. Прохождение фронта при западных вторжениях сопровождается почти всегда выпадением снега. В первые дни трансформационного периода, главным образом, вследствие продолжающейся холодной адвекции, в большинстве случаев удерживается похолодание, часто сопровождающееся выпадением осадков. Сезонное изменение атмосферной циркуляции зависит от перемещения областей высокого и низкого давления на обширной территории.

В холодном сезоне для циркуляционных процессов характерно частое прохождение циклонов, зарождающихся в Атлантическом океане и идущих

сюда через Средиземное и Черное моря, причем 54% проходящих циклонов углубляются над Черным морем [3, с. 5]. В теплом сезоне господствует антициклональный тип циркуляции, связанный с отрогом Азорского максимума. Частые вторжения термически разнообразных воздушных масс в сложных орографических условиях определяют разнообразие погоды в разное время года. Ниже вкратце остановимся на изменении циркуляционных процессов и связанных с ним погод по сезонам года.

Зима. На климат Абхазии значительное влияние оказывают воздушные массы, которые формируются в Арктике и восточной Сибири. В зимнее время в южную часть русской равнины проникает антициклональный воздух умеренных широт восточной Сибири, который еще больше усиливается под действием вторгающихся с севера Арктических воздушных масс. Главный водораздельный хребет Кавказа, средняя высота которого в пределах Абхазии достигает 3500 метров, является важным климаторазделом не пропускающим с севера холодные арктические и сибирские воздушные массы. Этот холодный воздух над Черным морем согревается, набирает влагу и приходит в Абхазию значительно измененным. Во время вторжения антициклональных холодных воздушных масс на территории Абхазии устанавливается холодная и ясная погода. Зимой со стороны Черного моря часто приходят циклоны. Они приносят обильные осадки и повышение температуры. Во время циклонов погода характеризуется неустойчивостью, частыми дождями в прибрежной зоне и продолжительными снегопадами в высокогорных районах (рис. 5).

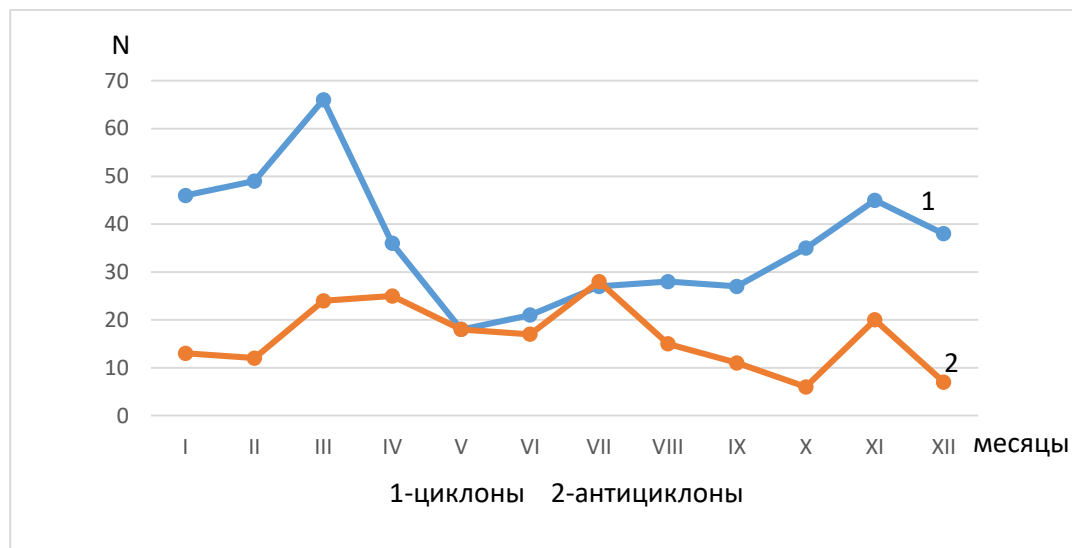


Рис. 5. Распределение циклонов и антициклонов по месяцам за последние 10 лет

Роль Кавказских гор в это время исключительно велика, так как они препятствуют свободному передвижению холодных воздушных масс на юг. Но последние, при соответствующих синоптических условиях, огибают Кавказский хребет с запада, что обуславливает вторжение на Черноморское побережье воздушных масс континентального арктического воздуха и континентального воздуха умеренных широт [4, с. 12, 5, с. 34]. Так что территория Абхазии все-таки полностью защищена от вторжения холодных

масс извне. Что же касается вторжения с востока, то оно почти не имеет никакого значения для погодных условий Абхазии.

Весна. Первый месяц весны, март, характеризуется неустойчивой погодой. В это время еще сохраняются те циркуляционные процессы, которые действовали зимой. Под действием циклонов, идущих со Средиземного моря, происходит повышение температуры воздуха. Влияние Сибирского антициклона и арктических воздушных масс все уменьшается. Только в редких случаях в тылу циклонов проникают холодные антициклональные воздушные массы, которые вызывают похолодание даже на морском побережье, хотя количество осадков в это время минимальное. Весной усиливается термическая конвекция, но несмотря на это из-за ослабления циклонов количество осадков меньше, чем зимой.

Лето. Под влиянием Азорского субтропического максимума на побережье Абхазии ослабевают фронтальные процессы и, в связи с возрастанием радиационных процессов, устанавливается несколько повышенное давление с длительным господством сухой погоды с преобладанием местного тропического воздуха. Количество осадков и облачность летом уменьшается, так как морской воздух приходит на нагретое побережье, но относительная влажность воздуха достигает максимальной величины. В летние месяцы уменьшается влияние сухих и жарких ветров – фёнов.

Осень. Осенью восстанавливаются те циркуляционные процессы, которые приостановились весной [3, с. 29]. В сентябре число циклонических возмущений, возникающих в Средиземном море, еще очень невелико, в последующие осенние месяцы оно постепенно возрастает и во второй половине ноября приближается к зимним значениям (рис. 5). Осенью начинается усиливаться Исландский минимум, в связи с чем холодные воздушные массы могут проникать дальше на юг, что обуславливает холодные вторжения в Абхазию с запада. Этим процессом прерывается длительный период сухой, теплой и спокойной осенней погоды.

В межгодовом распределении циклонов в последнее десятилетие отмечается снижение частоты проявления циклонической деятельности, особенно в летнее время, по -видимому, это связано с перестройкой циркуляционных процессов под влиянием глобального потепления (рис. 6).

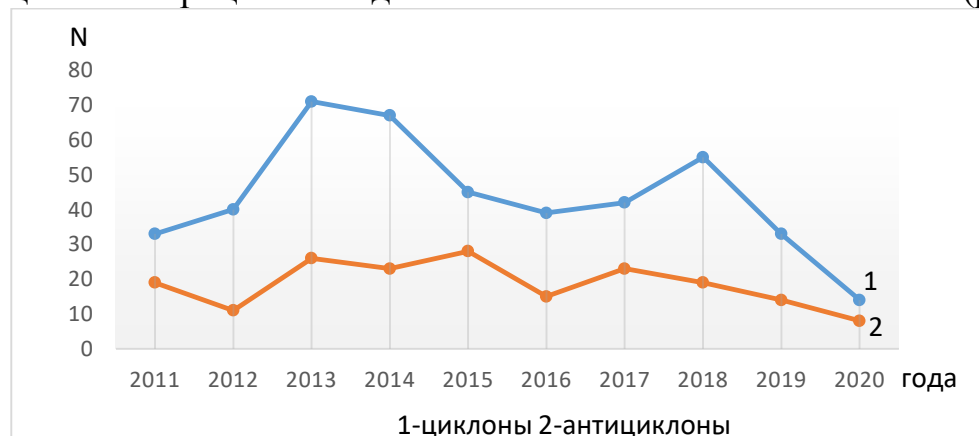


Рис.6. Распределение циклонов и антициклонов по годам за последние 10 лет

Прохождение холодных фронтов сопровождается шквалами, грозами и выпадением ливневых осадков. Значительной шквалистостью обладают фронты, имеющие перед собой тёплый тропический воздух.

По данным Сухумской метеорологической станции в Абхазии господствующими в течение года являются северные и северо-восточные ветры, причем первые дуют в осенние месяцы, а вторые в основном – зимой. Нередки так же западные и юго-западные ветры. Характерно, что на Черноморском побережье Абхазии сила ветров невелика. Несмотря на это, иногда, особенно осенью над побережьем проходят сильные шквалы, вызывая большие разрушения [1, с. 97]. Причины такого явления заключаются в усилении осенью циклонической деятельности и прохождением в тыл теплового воздуха холодных масс. Самой спокойной в отношении ветров является северная часть побережья в то время, как к югу повторяемость и сила ветров постепенно увеличиваются, что объясняется степенью защищенности этих пунктов горами.

Наряду с радиационными и циркуляционными факторами на климат Абхазии огромное влияние оказывает рельеф. Главный Кавказский хребет, направляющийся с северо-запада на юго-восток, является естественным рубежом, который с севера защищает территорию Абхазии от вторжения холодных воздушных масс, а также затрудняет перенос тропических воздушных масс с юга на север, чем способствует повышению температуры воздуха на горных склонах. Кроме того, система Кавказских гор обуславливает возникновение барьерных орографических осадков, обостряет фронтальную деятельность в проходящих циклонах и вызывает длительное стационарирование циклонических систем в Закавказье.

Выводы

Характерной особенностью умеренных широт является разнообразие воздушных масс: арктических (антарктических), полярных (они господствующие), тропических, как морских, так и континентальных, смещающихся с запада на восток. В циклонах северного полушария эти вихри движутся по спирали против часовой стрелки, в южном - по часовой, но всегда направлены к центру циклона.

Причиной движения воздуха в атмосфере является разница давления над земной поверхностью, что обусловлено неравномерностью распределения солнечной радиации и неоднородностью подстилающей поверхности.

Средние годовые величины давления воздуха на территории Абхазии, приведенные к уровню моря, составляют 1015-1017мб. Годовая амплитуда растет с увеличением континентальности климата. В прибрежных районах она близка к 10мб. В годовом ходе отчетливо обнаруживаются сезонные особенности территориального распределения давления, наиболее резко выраженные зимой и летом. Их годовой ход типичен для климата прибрежных территорий с максимумом обычно в декабре-январе и минимумом повсеместно в июле.

В холодном сезоне наиболее повторяются здесь воздушные массы морского воздуха умеренных широт, реже с северо-запада бывают вторжение

холодного континентального воздуха умеренных широт и арктического континентального воздуха. Проходя над теплой поверхностью Черного моря они согреваются и не вызывают на Кавказском побережье такого резкого похолодания. С юга и юго-востока зимой изредка входят тропические воздушные массы. В теплом сезоне господствующее положение занимает тропический морской и континентальный воздух, входящий сюда с юга и юго-запада и образующийся на побережье за счет прогрева и трансформации из воздуха умеренных широт.

Список литературы

1. Ахсалба А.К., Пачулия Э.В., Ветровой режим атмосферы на территории Абхазии. Материалы V Международной научно-практической конференции. Ч. 2. Изд-во «ИП Кучеренко В.О.». - Майкоп, 2019. С. 95-102.
2. Braginsky A.Y. *Plane vortex motion of a continuous medium. Description of air rotation in cyclones and anticyclones.* Z. Angew. Math. Phys. **70**, 177 (2019).
3. Куфтырёва Н.С., Лашхия Ш.В., Мгеладзе К.Г., Природа Абхазии. - Сухум, 1961, 340 с.
4. Экба Я.А., Ахсалба А.К. Физическая экология атмосферы. – Сухум: Академия, 2018. – 431 с.
5. Экба Я.А., Дбар С.Р., Экологическая климатология и природные ландшафты Абхазии. – Сочи: Папирус-М-Дизайн, 2007. - 240 с.

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ ВУЛКАНОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПСВ НА КАВКАЗЕ

^{1,2}Я.А. Экба., ^{1,2}А.К. Ахсалба, ^{1,2}Л.В. Хинтуба

ekba-yan@yandex.ru; asida_cen@mail.ru; LolitaKhintuba@yandex.ru

¹*Абхазский государственный университет, Абхазия, г. Сухум*

²*Институт экологии Академии наук Абхазии, Абхазия, г. Сухум*

Несмотря на то, что антропогенное воздействие, согласно современным представлениям вносит определённый вклад в глобальное потепление, наблюдавшееся в последнее столетие, роль естественных внешних воздействий на климатическую систему, а также вклад естественной климатической изменчивости несравненно более значительны. Среди естественных внешних воздействий, значимых на масштабах десятилетий и столетий, можно выделить изменение солнечной активности и вулканическую активность [1, с. 83].

В результате крупных вулканических извержений в атмосферу выбрасывается большое количество соединений серы. При этом большая часть этих соединений оказывается в стратосфере, где остается в течение 1- 2 лет [14, с. 49]. Охлаждающее воздействие для наиболее сильных извержений по абсолютной величине достигает 3-5 Вт м⁻², а для наиболее мощных вулканов, например, Пинатубо (Филиппины, 1991) ослабление может достигать ~6 Вт м⁻² [5, с. 35]. Как следствие, вулканические извержения приводят к похолоданию климата в течении 1-2 лет [10, с. 115].

В частности, после извержения вулкана Тамбора летом 1816 г. было аномально холодным (“год без лета”). С другой стороны, зимой, следующей после извержения вулкана в тропиках или субтропиках, отмечается потепление над сушей внетропических широт Северного и Южного полушарий [8, с. 535].

Последнее связывают с откликом циркуляции тропосферы (развитием положительной фазы Арктического и Антарктического колебаний) и усилением адвективного переноса тепла с океанических регионов на сушу. Зимнее потепление суши Северного полушария не проявляется при извержениях высоких широт, например, при извержении вулкана Катмай (1912 г.) [12, с. 3]. Кроме того, уменьшение притока солнечной радиации к поверхности океана вызывает уменьшение испарения и соответствующее уменьшение осадков [2, с. 4].

При увеличении повторяемости вулканических извержений в отдельные периоды они могут привести к заметному похолоданию климата в эти периоды. Так, совместное уменьшение солнечной постоянной и усиление вулканической активности считается основной причиной развития малого ледникового периода XVII-XIX веков. В свою очередь, уменьшение вулканической активности и рост солнечной постоянной могут служить причиной как средневекового климатического оптимума IX-XII веков, так и

потепления, наблюдавшегося, в первой половине XX века [11, с. 8, 14, с. 9].

В фундаментальной работе (Елисеева, Мохова, 2008) приводится описание схемы учета вулканического воздействия в климатической модели промежуточной сложности, разработанной в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) и оценка влияния вулканической активности на вариации климата последних нескольких столетий. При этом, в частности, сделан вывод о возможности использования КМ ИФА РАН для оценки эффективности предотвращения глобального потепления, связанно с контролируемой эмиссией соединений серы в стратосферу [3, с. 40, 9, с. 244, 10, с. 115].

Отклик модели на извержение Пинатубо (как примера сильного извержения вулкана, расположенного в тропиках) летом характеризуется приповерхностным похолоданием 0.5 – 1 К над большей частью внетропической суши северного полушария и Южного океана. Это качественно согласуется с оценкой по данным наблюдений для марта- октября. Зимний отклик КМ ИФА РАН, также характеризуется сильным похолоданием, максимальным над сушей внетропических широт северного полушария (>1 К). Это существенно отличается от данных наблюдений следует отметить, что зимнее потепление над сушей внетропических широт не воспроизводится и рядом других современных климатических моделей [5, с. 41, 9, с. 241].

Отклик осадков на извержение Пинатубо в КМ ИФА РАН характеризуется развитием сильной засушливой аномалии вне тропиков. Это качественно согласуется с результатами анализа данных наблюдений осадков и результатами расчетов с другими моделями климата [5, с. 41, 7, с. 380].

Отклик модели на извержения вулкана Катмай (как примера сильного извержения высоких широт) также характеризуется значительными холодными аномалиями у поверхности во внетропической зоне северного полушария. Над внетропическими регионами суши этого полушария зимой 1913 г. похолодание достигает 1-2 К, а в среднем за 1913 г. - 0.5-1 К. Эти результаты в целом согласуются с соответствующими.

Средние по ансамблю численные эксперименты, с КМ ИФА РАН коэффициенты линейного тренда глобальной приповерхностной температуры атмосферы (в К/век). Как следствие, можно предполагать, что роль вулканической активности в этом потеплении не является пренебрежимо малой.

При глобальном осреднении рост приповерхностной температуры атмосферы к середине XIX века относительно начала XVII века составляет около 0.6 К для обоих экспериментов ALL и GHGSASOL. Основной вклад в это потепление в КМ ИФА РАН обеспечивается общим ростом солнечной постоянной в этот период. Дополнительный (по отношению к GHGSASOL) учет вулканического воздействия в эксперименте ALL приводит к кратковременным (длительностью 1-3 года) похолоданиям после крупных извержений с пренебрежимо малым различием T_g между этими двумя экспериментами в периоды малой интенсивности. Учет вулканического воздействия на климат, наряду с учетом влияния изменения светимости

солнца, позволил частично воспроизвести в КМ ИФА РАН не монотонность потепления климата в XX веке с ростом глобальной температуры в 1910-1930-х гг. и 1970-1980-х гг. и уменьшением в 1940-1960-х гг. [10, с. 116, 12, с. 745].

Однако различие междекадных вариаций температуры в XX веке между КМ ИФА РАН и наблюдениями остается существенным и может быть связано с ролью естественной изменчивости климата в таких вариациях и или не учетом других воздействий на климат (например, изменения концентрации озона в атмосфере).

Исходя из изложенного в обобщённой модели, охватывающей временное пространство в несколько веков и значительные территории (Северное и Южное полушария), трудно выделить непосредственное воздействие вулканов на фоне остальных многочисленных факторов, воздействующих на климатическую составляющую.

В предлагаемой работе основное внимание уделяется исследованию пространственно-временного распределения последствий воздействия трёх наиболее мощных вулкана: Эль-Чичон (Мексика, 1982), Пинатубо (Филлипины, 1991), Эйяфьятлайокудль (Исландия, 2010), извержение которых происходило в период глобального потепления климата (1980-2010гг) и оказало заметное влияние на среднегодовую температуру не только на территории Абхазии, но и по всему Кавказскому региону [1, с. 85].

При катастрофических извержениях выбросы вулканической пыли и газов, сублимирующих частички серы и других летучих компонентов, могут достигать стратосферы и вызывать катастрофические изменения климата [14, с. 53].

Вулканическая деятельность сопровождается поступлением в атмосферу огромного количества разнообразных по размеру и составу веществ. Это могут быть жидкие и твердые аэрозоли, а также газы, из которых впоследствии формируются вторичные частицы - например, газообразный оксид серы, который затем окисляется до H_2SO_4 . [13, с. 17].

По данным Г.В. Сурковой [13]. оптическая толщина атмосферы после извержений вулканов Агунг (1963 г.), Фуэго (Гватемала, 1974 г.), Сент-Хеленс (США, 1980 г.) в течение двух лет была ниже средней на 10% и более, а после извержений вулкана Эль-Чичон (Мексика, 1982) и Пинатубо (Филлипины, 1991) - на 50%. Возможно, что столь длительный эффект был вызван вторичными аэрозолями, образовавшимися из продуктов извержения. Поступление вулканического вещества в атмосферу влечет изменение режима химических процессов. Так, например, вслед за мощными извержениями вулканов Эль-Чичон (Мексика, 1982 г.) и Пинатубо (Филиппины, 1991 г.) наблюдалось уменьшение общего содержания озона в атмосфере [16, с. 23].

Вулканы воздействуют на природную среду и на человечество несколькими способами. Во-первых, прямым воздействием на окружающую среду извергающихся вулканических продуктов (лав, пеплов и т. п.), во-вторых, воздействием газов и тонких пеплов на атмосферу и тем самым на климат, в-третьих, воздействием тепла продуктов вулканизма на лед и на снег, часто покрывающих вершины вулканов, что приводит к катастрофическим

сялям, наводнениям, лавинам, в-четвертых, вулканические извержения обычно сопровождаются землетрясениями и т.д. Но особенно долговременны и глобальны воздействия вулканического вещества на атмосферу, что отражается на изменении климата Земли [15, с. 61].

Нужно полагать, что даже кратковременная, по меркам жизни человека, масштабная вулканическая активность может изменить радиационный баланс планеты, являющийся энергетической основой существования и развития экосистемы, циркуляции атмосферы, морских течений и прочих процессов [8, с. 336]. Выбрасываемые в воздух аэрозоли поглощают часть исходящего от земли тепла и рассеивают значительную часть входящего солнечного излучения. Этот эффект может сохраняться на протяжении от двух до трех лет. Рассмотрение динамики среднегодовой температуры приземного слоя воздуха за период 1960-2019гг. (рис.1) позволяет выделить ряд специфических черт.

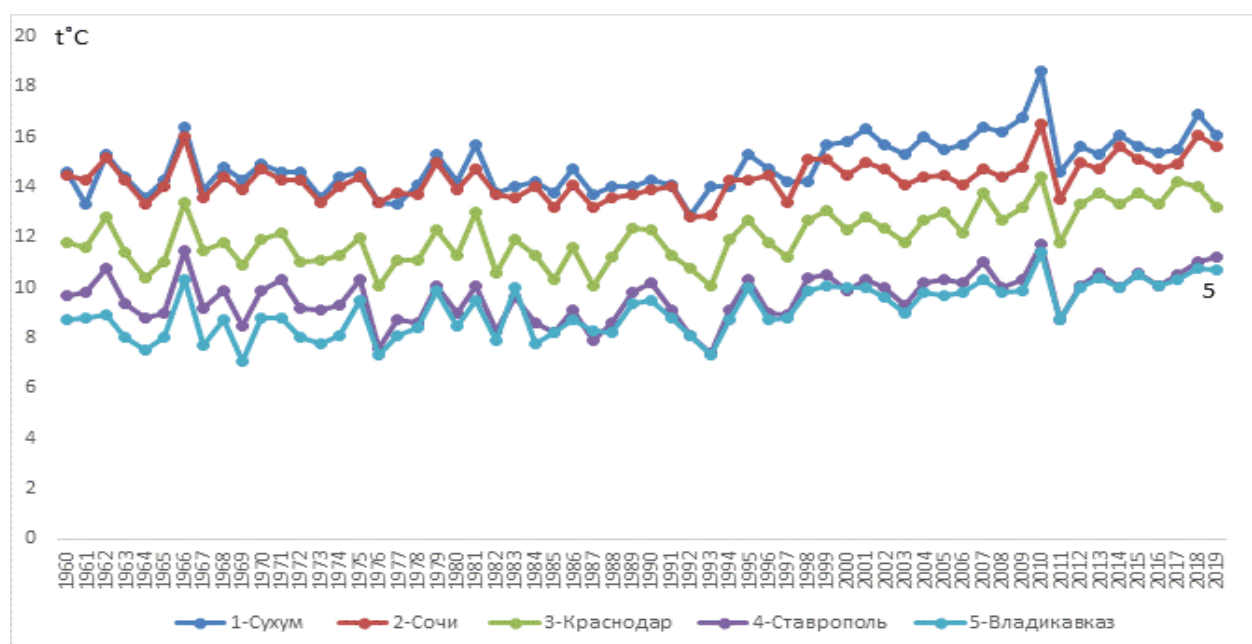


Рис.1 Распределение среднегодовых температур ПСВ по основным метеостанциям Кавказа

Во-первых, это ярко выраженная тенденция к росту температуры. Средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха на территории Абхазии в 1976-2020гг. составила 0,9°C/10лет, что в 5 раза больше скорости роста глобальной температуры за тот же период 0,17°C/10лет. Именно эта тенденция и послужила основой для формирования традиционной концепции антропогенного потепления.

Второй особенностью динамики являются локальные максимумы температуры, пришедшиеся на 1980-ые, 1990-ые и особенно в период 2010-ых годов. Наличие этих максимумов интерпретируется как проявление 60-70-летних климатических циклов [10, с.17].

Третья особенность, проявляющаяся на кривой 5-летнего скользящего среднего, состоит в фиксации локальных минимумов температуры с периодичностью, связанной с извержением вулканов Эль-Чичон (Мексика, 1982), Пинатубо (Филлипины, 1991), Эйяфьятлайокудль (Исландия, 2010).

Изменения абсолютных значений температуры и степень этих изменений представляют собой важные параметры, характеризующие возможные последствия изменений климата Земли. Эти последствия- таяние ледников, повышение уровня воды в морях, наводнения, засухи, изменения биоты и ряд других явлений [12, с.752].

Особенностью тенденции изменения среднегодовых температур ПСВ для всех шести метеостанций (Сухум, Сочи, Туапсе, Анапа, Краснодар, Владикавказ, Ставрополь), расположенных в различных климатических зонах является их практическая синхронность, с высоким коэффициентом корреляции $r > 0,85$. Кроме того, такая же синхронность наблюдается в скачкообразном понижении среднегодовой температуры ПСВ в год последующий за извержением. В зависимости от удалённости пункта от вулканического очага, особенностей распространения тephры в тропосфере и стратосфере эффект понижения температуры может быть различным. В табл.1 представлены перепады среднегодовых температур ПСВ, вызванные вулканическими извержениями. По всей видимости, в этих случаях основная роль в понижении температуры воздуха принадлежит стратосферному аэрозолю, который сохраняется в атмосфере в течение длительного времени [15, с. 225].

Таблица 1

Перепады среднегодовых температур ПСВ, под воздействием извержения вулканов

Пункт наблюдения	Эль-Чичон $\Delta t^{\circ}C = t_{83} - t_{82}$	Пинатубо $\Delta t^{\circ}C = t_{92} - t_{91}$	Эйяфьятлайёкудль $\Delta t^{\circ}C = t_{11} - t_{10}$
Сухум	-0,2	-1,2	-4
Сочи	0,1	-1,2	-3
Краснодар	-1,3	-0,5	-2,6
Ставрополь	-1,3	-1	-3
Владикавказ	-2,1	-0,7	-2,7
Анапа	-0,4	-0,5	-2,7
Туапсе	-0,1	-0,9	-2,9

Глобальные температуры тоже реагируют на вулканические извержения, понижения температур составили: вулкан Эль-Чичон, 1982г- 0,1°C; Пинатубо, 1991 г. -0,1°C; Эйяфьятлайокудль, 2010 г. - 0,2°C. Но поскольку глобальные температуры являются следствием значительных пространственно-временных осреднений, их амплитуда колебаний существенно меньше региональных [16, с. 53].

Существенный интерес, с точки зрения выявления механизмов воздействия извержения вулканов на температуру ПСВ, представляет сезонное распределение отклонений среднемесячных значений температур ПСВ от средних многолетних, предшествующих извержению, по пунктам с различными климатическими условиями. В табл. 2 представлены отклонения среднегодовых температур, вызванные извержением вулкана Эйяфьятлайокудль (Исландия, 2010 г).

Таблица 2

Отклонения значений среднемесячных температур ПСВ, вызванных воздействием вулкана Эйяфьятлайокудль (Исландия, 2010 г.), от средних многолетних за предыдущие годы

Пункт наблюдения	$\Delta t^{\circ}\text{C} = t^{\circ}_{11} - t^{\circ}_{\text{cp}10}$											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Сухум	1,4	-1,6	-0,2	-2,3	-1,6	-0,2	0,3	-0,7	-0,5	-1,7	-5,4	-0,7
Владикавказ	0,7	-3,2	-1	-2,7	-0,9	-0,2	1,9	-1,3	-0,3	-1,1	-5,6	1,9
Краснодар	-0,8	-3,5	-1,6	-2,4	-0,6	0,8	2,2	-0,8	0,3	-1,2	-5,5	3,4
Сочи	0,6	-2,6	-0,9	-2,2	-1,6	-0,9	0,3	-1,2	-0,8	-1,7	-4,9	0,5
Ставрополь	-0,7	-4,4	-1,7	-2,8	-0,7	-0,2	1,5	-1,4	-0,2	-1,7	-6,2	2,3
Туапсе	0,3	-2,5	-0,8	-1,7	-0,6	0,1	1	-0,7	-0,1	-1,7	-5,4	1,9
Анапа	-0,7	-3	-1,4	-1	-0,2	1	0,6	-0,1	0,4	-1,6	-6,2	2,8

Из анализа таблицы следует, отклонения температур ПСВ существенным образом зависят от времени года. Перепад температур в первом случае составляет от $-1,6^{\circ}\text{C}$ (Сухум) до $-4,4^{\circ}\text{C}$ (Ставрополь), во втором случае эти отклонения достигают соответственно $-5,4^{\circ}\text{C}$, $-6,2^{\circ}\text{C}$. Наибольшие отклонения $-6,2^{\circ}\text{C}$ наблюдаются на метеостанции г. Ставрополя и Анапы.

В общем случае наиболее значимые понижения температур наблюдаются в регионах с континентальным климатом. В прибрежных пунктах наблюдений сказывается смягчающее действие морских акваторий. При этом в конце зимы (февраль) и последнего осеннего месяца (ноябрь) в год после извержения вулкана Эйяфьятлайокудль (Исландия, 2010 г.), температура синхронно во всех пунктах наблюдения резко понижается (рис. 2).

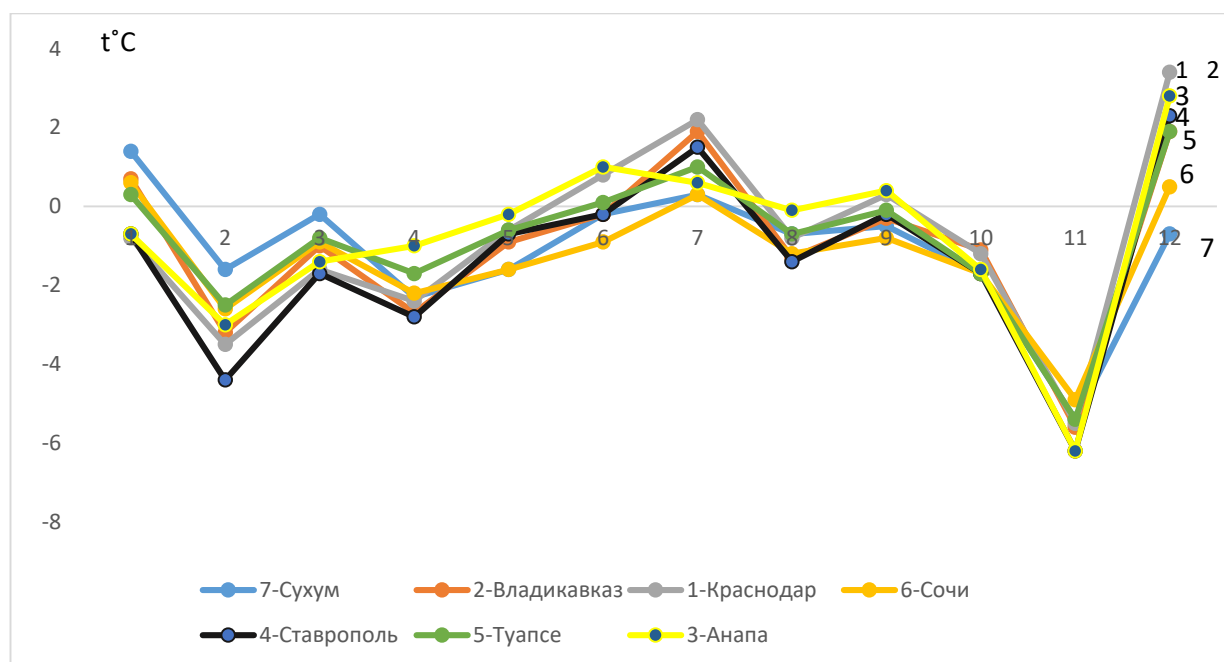


Рис. 2. Отклонение среднемесячных температур ПСВ в Кавказском регионе после извержения вулкана Эйяфьятлайокудль (Исландия, 2010 г)

Можно полагать, что столь резкие понижения температур не могут быть результатом действия парниковых газов, выделяемых при извержении, или снижением прозрачности атмосферы под влиянием аэрозольных выбросов в тропосферу и стратосферу. Вероятнее всего в атмосфере происходят такие перестройки циркуляционных процессов, которые позволяют Арктическим циклонам проникать в южные регионы, тем более, что указанные периоды понижения температур соответствуют весенней и зимней перестройке атмосферы, связанной с естественной активизацией циклонической деятельности.

В отличие от изложенного при общем существенном (скачкообразном) понижении среднегодовых температур, зимние и особенно летние температуры остаются значительно выше средних многолетних значений. Таким образом, создаётся «эффект тёплой зимы» и «жаркого» лета. По нашему мнению, одним из возможных вариантов объяснения изложенного может быть проявление парникового эффекта стратосферными аэрозолями в зимний сезон и активное влияние парниковых газов на температуру ПСВ в летний период. Извержения вулканов в значительной степени нарушают баланс вещества и перенос тепловой энергии в атмосфере, который является результатом сложного взаимодействия динамических, радиационных и химических процессов. В зависимости от высоты над земной поверхностью изменяется роль этих процессов в цикле преобразований химических веществ. В нижних слоях атмосферы большую роль играют динамические процессы. С высотой интенсивность солнечной радиации возрастает, увеличивая роль фотохимических процессов в образовании новых соединений.

Атмосфера Земли на 99,9% состоит из молекулярного азота, аргона и кислорода. Но, несмотря на малые концентрации других веществ в атмосфере, они играют важную роль в формировании климатического режима. Влияние химического состава атмосферы на климат может быть прямым и косвенным. Прямое влияние заключается в том, что оптические свойства атмосферы, а, следовательно, и бюджет тепла климатической системы, определены ее химическим составом. Например, углекислый газ, метан, тропосферный озон и другие, так называемые парниковые газы, поглощают уходящую от земной поверхности длинноволновую радиацию, способствуя повышению температуры в тропосфере и охлаждению стратосферы. Косвенное влияние касается химических преобразований в атмосфере, приводящих к изменению концентраций оптически активных соединений, контролирующих радиационно-тепловой баланс. Так, угарный газ, оксиды азота и летучие органические соединения влияют на тропосферные и стратосферные концентрации озона.

Уменьшение концентрации озона вызывает понижение температуры в стратосфере и, кроме того, способствует возрастанию количества проникающей к поверхности ультрафиолетовой радиации. Рост количества атмосферного аэрозоля затрудняет прохождение солнечной радиации через толщу атмосферы, как напрямую, путем увеличения рассеяния радиации при

ясном небе, так и косвенным образом, за счет увеличения отражательной способности и времени жизни облаков.

Несмотря на мощность разовых выбросов, вулканические источники аэрозолей локализованы в пространстве и ограничены во времени продолжительностью извержения.

Учитывая, что парниковые газы антропогенного происхождения в несколько раз превышают по объёму выбросы вулканов, можно полагать, что вулканическая деятельность не оказывает существенного влияния на парниковый эффект из-за локальности и кратковременности действия.

Однако, вулканическая деятельность несомненно приводит к глобальному понижению температуры ПСВ на $0,5-2^0$ С, в год последующий за извержением, следствием чего может явиться длительное похолодание.

Хотелось особо отметить, значительное снижение температуры ПСВ после извержения вулкана Эйяфьятлайокудль (Исландия, 14-19.04.2010г) и в последующие годы [3, с. 44, 15, с. 225, 16, с. 63].

Выводы

Особенностью тенденции изменения среднегодовых температур ПСВ для всех шести метеостанций (Сухум, Сочи, Туапсе, Анапа, Краснодар, Владикавказ, Ставрополь), расположенных в различных климатических зонах является их практическая синхронность, с высоким коэффициентом корреляции. Кроме того, такая же синхронность наблюдается в скачкообразном понижении среднегодовой температуры ПСВ в год последующий за извержением.

Отклонения температур ПСВ существенным образом зависят от времени года. При этом в конце зимы (февраль) и последнего осеннего месяца (ноябрь) в год после извержения вулкана Эйяфьятлайокудль (Исландия, 2010 г.), температура синхронно во всех пунктах наблюдения резко понижается. В общем случае наиболее значимые понижения температур наблюдаются в регионах с континентальным климатом.

В тоже время при общем существенном понижении среднегодовой температуры в год, следующий за извержением, температура ПСВ в летний период (июль) и зимой (декабрь-январь) повышается, что вероятно связано с парниковыми свойствами стратосферного аэрозоля.

Учитывая, что парниковые газы антропогенного происхождения в несколько раз превышают по объёму выбросы вулканов, можно полагать, что вулканическая деятельность не оказывает существенного влияния на парниковый эффект из-за локальности и кратковременности действия.

Однако, вулканическая деятельность несомненно приводит к глобальному понижению температуры ПСВ на $0,5-2^0$ С, в год последующий за извержением, следствием чего может явиться длительное похолодание.

Список литературы

1. Ахсалба А.К., Эмба Я.А. Индикаторы климатических зон Абхазии. Материалы IV Международной научно-технической конференции. - Майкоп, 2017. Ч.1. С. 82-88.
2. Будыко М.И. Изменение климата. - Л.: Гидрометео-издат, 1974. 280 с.

3. Гройсман П.Я. Региональные климатические воздействия вулканических извержений // Метеорология и гидрология. 1985. №4. С. 39-45.
4. Groisman P.Ya. Possible regional climate consequences of the Pinatubo eruption: an empirical approach // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. №15. P/ 1603-1606.
5. Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоленицкий Ф.М., Фролов И. Е. Что происходит с климатом Земли? // Экологический вестник России. 2012. № 5. С. 34-41.
6. Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние вулканической активности на изменение климата последних нескольких веков: оценки с климатической моделью промежуточной сложности. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2008, том 44, №6. С. 723-736.
7. Замолодчиков Д.Г. Прогноз роста глобальной температуры в XXI веке на основе простой статистической модели. // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8, №2. С. 379-390.
8. Кондратьев К.Я. От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействия атмосферного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. №7. С.535-536.
9. Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // ДАН. 2005. Т. 402. № 2. С. 243-247.
10. Мохов И.И., Безверхний В.А., Елисеев А.В., Карпенко А.А. Взаимосвязь изменений глобальной приповерхностной температуры с изменениями солнечной активности по данным наблюдений и реконструкций для XVII-XX веков и по модельным расчетам // ДАН. 2006. V. 409. № 1. P. 115-119.
11. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М. Астрей, 2000, 1999. - 766 с.
12. Семенов В.А. Структура температурной изменчивости в высоких широтах Северного полушария // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 6. С. 744-753.
13. Суркова Г.В. Химия атмосферы. М, изд. МГУ. 2002. - 210 с.
14. Фролов И.Е. Гудкович З.М., Карклин В.П. Смоляницкий Ф.М. Изменения климата результат действия естественных причин // Экологический вестник России. 2010. №1. С. 49-54.
15. Экба Я. А. Хинтуба Л. В. Влияние стратосферного аэрозоля на температуру приземного слоя воздуха. Материалы V Международной научно-практической конференции. Часть 2. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2019. - С. 225.
16. Экба Я.А., Ахсалба А.К. Физическая экология атмосферы. - Краснодар-Сухум, Академия, 2018. – 431 с.

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ: РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ ГОЛОЦЕНА

Т.А. Янина, Б.Ф. Романюк, В.М. Сорокин

paleo@inbox.ru

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

Колебания уровня Каспия на разных этапах его геологической истории зависели от многих (как геологических, так и климатических) факторов. В голоцене определяющая роль принадлежала разномасштабным и разнонаправленным изменениям климата. Задача данной работы – на основе анализа строения осадочной толщи Северного Каспия реконструировать колебания уровня под влиянием изменений климата. Материалом послужили результаты обработки сейсмоакустических профилей, литологического, фаунистического и геохронологического (радиоуглеродный анализ) изучения керна скважин и донных колонок. Бурение выполнено ООО Моринжгеология, литологический и фаунистический анализы проведены в Московском государственном университете, а радиоуглеродные датировки получены в лабораториях государственного университета и педагогического университета Санкт-Петербурга и в Институте географии РАН. Калиброванный возраст рассчитан по программе CalPal Кельнского университета [www.calpal.de]. Материалы о климатических событиях голоцена взяты из литературных источников.

В строении осадочной толщи Северного Каспия нашли отражение палеогеографические события голоцена: мангышлакская регрессия и новокаспийская трансгрессия, развивавшаяся стадийно. Мангышлакская регрессия датируется временным интервалом ~11500–8000 лет. В климатическом отношении эта эпоха раннего голоцена (бореал, согласно схеме Блитта–Сернандера) характеризовалась сравнительно высокой теплообеспеченностью и сухостью [2, 5]. Такое соотношение климатических показателей привело к повышению отрицательной составляющей водного баланса Каспия и его регрессии. Результаты палинологического анализа свидетельствуют о ксерофитизации растительного покрова в Каспийском регионе в эпоху мангышлакской регрессии [1]. Среднегодовое количество осадков меньше современных значений реконструировано для бассейна Волги в период до 9500 л.н. [4].

В развитии новокаспийской трансгрессии установлены три трансгрессивных стадии. Первая датируется интервалом 8200–5600 л.н. В климатическом отношении (атлантический оптимум голоцена) ее большая часть относится к эпохе теплого и влажного климата [4, 5]. Вывод о существовании продолжительного этапа потепления и увлажнения климата в Нижнем Поволжье в интервале ~8500–7600 и с 6100 до 5000 л.н. сделан Болиховской [1]. Сменившая ее регрессивная стадия имеет возрастные рамки 5600–3700 л.н. Уровень Каспия снизился на 8 м, придельтовая равнина вышла из-под каспийских вод и подверглась эрозионному расчленению и

воздействию субэаральных процессов. В климатическом отношении это период суббореального термического максимума голоцена (4700–3600 л. н.), установленный для Восточно-Европейской части России [5], и период иссушения климата в Поволжье [1].

Вторая трансгрессивная стадия охватывала временной интервал 3600–3400 л.н. Это была эпоха поздне-суббореального похолодания на Восточно-Европейской равнине [5]. Фаза увлажнения климата, начавшаяся около 3500 л. н., реконструирована для Нижней Волги [1]. Вторая регрессивная стадия датируется 3080–2300 л.н. Уровень бассейна упал на 6–8 м, в придельтовой равнине образовались врезы, заполненные пресной водой. Очевидно, это был отклик Каспия на этап потепления и сокращения количества осадков в бассейне Волги [4]. Последовавшее вслед за регрессивным событием поднятие уровня Каспия произошло после 2300 лет назад. Этому периоду позднего голоцена отвечают две ярко выраженные климатические фазы: «средневековый климатический оптимум» (950–1250 гг.), с количеством осадков на Восточно-Европейской равнине на 25–50 мм ниже современного [3], и «малый ледниковый период» (1400–1700 гг.) [2]. Трансгрессивные осадки в Северном Каспии имеют даты 1700–1100 и 900–360 л.н. Хиатус между ними дает основание к предположению о снижении уровня Каспия в теплый сухой период средневековья, а вторая группа дат отвечает трансгрессивному подъему Каспия в прохладный и влажный климатический эпизод (малый ледниковый период).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 21-44-04401).

Список литературы

1. Болиховская Н.С. Эволюция климата и ландшафтов Нижнего Поволжья в голоцене // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 2. С. 13–27.
2. Борисова О.К. Ландшафтно-климатические изменения в голоцене // Изв. РАН. Сер. геогр. 2014. № 2. С. 5–20.
3. Климанов В.А., Хотинский Н.А., Благовещенская Н.В. Колебания климата за исторический период в центре Русской равнины // Изв. РАН. Сер. геогр. 1995. № 1. С. 89–96.
4. Новенко Е.Ю. Изменения растительности и климата центральной и восточной Европы в позднем плейстоцене и голоцене в межледниковые и переходные этапы климатических макроциклов. Автореф. дис. ... докт. геогр. н., 2016. 44 с.
5. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука, 1977. - 200 с.

АТЕЛЬСКАЯ РЕГРЕССИЯ КАСПИЯ КАК ОТРАЖЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ

Т.А. Янина, Н.С. Болиховская, В.М. Сорокин

paleo@inbox.ru

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

Ательская свита осадков, сформировавшаяся в эпоху глубокой (до - 100 м) регрессии Каспия, является ярким репером в строении разрезов Нижнего Поволжья. Она представлена континентальными образованиями различного генезиса мощностью до 20 м. В ее основании ярко выражены следы мерзлотных деформаций и клинья, проникающие в подстилающие слои на глубину до трех метров. В строении толщи верхнеплейстоценовых отложений бассейна Северного Каспия, согласно данным сейсмоакустического профилирования [1], ательская регрессия выражена врезами под хвалынскими отложениями. Ательская регрессивная толща имеет неоднородный литологический состав: чередуясь, в ней залегают суглинки, супеси и глины, находящиеся в полутвердом, реже в тугопластичном, состоянии, включающие растительные остатки и раковины пресноводных и наземных моллюсков.

Ательская регрессия признается практически всеми исследователями Каспия. Однако представления о ее возрастных рамках, о корреляции с глобальными климатическими событиями и с ледниково-межледниковыми событиями на Русской равнине очень разные. Задача нашей работы – выявить наличие корреляционной связи ательской регрессии с климатическими событиями позднего плейстоцена. Материалом для палеогеографических реконструкций послужили результаты комплексного анализа ательских осадков керна скважин, пробуренных в Северном Каспии.

Согласно анализам малакофауны и макрорастительных остатков, осадки накапливались в небольших пресноводных или слабосоленоватых бассейнах [1]. Полученные спорово-пыльцевые данные показали, что отложения, залегающие в подошве ательской толщи, формировались в прохладном климате, в фазу господства сосново-еловых (с примесью пихты и лиственницы) лесов и ольшанников [2]. Спорово-пыльцевые спектры более высоких слоев отражают развитие перигляциальных лесостепных ландшафтов. Спорово-пыльцевые спектры верхней части толщи ательских отложений отражают значительное усиление похолодания, вызвавшее распространение тундро-лесостепных природных обстановок. Как видим, результаты спорово-пыльцевого анализа свидетельствуют о значительной динамике климатических условий и природных ландшафтов Нижневолжского региона в течение ательской эпохи. Господствовали перигляциальные ландшафты. Интерпретация палеогеографической обстановки, выполненная на основе спорово-пыльцевого анализа, отвечает холодным условиям накопления ательской толщи в Северном Прикаспии, интерпретируемым по ее

строению: криотурбации в ее основании и клинья, секущие почвенные горизонты теплых эпох (MIS 5, согласно [3]).

Радиоуглеродные датировки по гуминовым кислотам, выделенным из оторфованных прослоев верхней части ательских отложений, лежат в возрастном интервале от 41191 ± 750 до 44390 ± 180 л.н. [1]. Они хорошо согласуются с ОСЛ датировками [3], полученными для ательских отложений опорного разреза Средняя Ахтуба (Нижнее Поволжье). Датировки указывают, что заключительные этапы ательской эпохи в Каспийском море относятся к начальным стадиям средневалдайского мегаинтерстадиала Восточно-Европейской равнины (MIS 3).

Логично заключить, что самый низкий уровень ательской регрессии и формирование эрозивных врезов на территории Северного Каспия были приурочены к максимальному похолоданию калининской ледниковой эпохи (MIS 4). Межстадиальному смягчению климата второй половины интервала MIS 3 отвечает повышение уровня Каспия и ранняя стадия хвалынской трансгрессии, о чем свидетельствуют результаты фаунистического анализа и радиоуглеродного датирования осадков керна. На побережье Северного Каспия в эту эпоху еще накапливались ательские отложения. Слабо выраженные горизонты почв в их строении отражают этапы смягчения климата [3].

На основании результатов комплексного палеогеографического анализа ательской толщи осадков можно заключить, что максимальный уровень ательской регрессии и формирование врезов на территории Северного Каспия были приурочены к глобальному похолоданию (MIS 4), которому отвечает калининское оледенение (стадия) на Восточно-Европейской равнине. Очевидно, холодная и сухая климатическая эпоха вызвала значительное увеличение отрицательной составляющей водного баланса Каспия, являвшегося озерным бассейном, что привело к его регрессии. Завершилась регрессия в первой половине межстадиала MIS 3.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-39-70020).

Список литературы

1. Безродных Ю.П., Сорокин В.М., Янина Т.А. Об ательской регрессии Каспийского моря // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. – 2015. № 2. С. 77–85.
2. Болиховская Н.С., Янина Т.А., Сорокин В.М. Природная обстановка ательской эпохи (по данным палинологического анализа) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. № 6. С. 96–101
3. Янина Т.А., Свиточ А.А., Курбанов Р.Н., Мюррей А., Ткач Н.Т., Сычев Н.В. Опыт датирования плейстоценовых отложений Нижнего Поволжья методом оптически стимулированной люминесценции // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. № 1. С. 21–29.