

ISSN 2587-5566

Том 87, Номер 3

Май - Июнь 2023

ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

# СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ



[www.sciencejournals.ru](http://www.sciencejournals.ru)



# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 87, номер 3, 2023

---

---

## ТЕОРИЯ И СОЦИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ГЕОГРАФИИ

Аксиоматический фундамент теории центральных мест: ревизия с позиций отечественной школы

*Р. В. Дмитриев, В. А. Шупер*

339

---

## ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЩЕСТВА

Структура единой энергосистемы России в постсоветский период

*З. А. Атаев*

348

Оценка условий и факторов формирования региональных авиахабов в Екатеринбургe, Тюмени, Новосибирске и Красноярске

*О. В. Сорокин, А. С. Волошок*

358

---

## ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

Ландшафтные инварианты – параметры порядка динамической системы

*А. С. Байбар, М. Ю. Пузаченко, Р. Б. Сандлерский, А. Н. Кренке*

370

Климат зональных ландшафтов равнин России при современном глобальном потеплении в летний период

*Т. Б. Титкова, А. Н. Золотокрылин*

391

---

## ЭВОЛЮЦИЯ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Новые данные о возрасте раннехвалынской трансгрессии Каспийского моря

*Р. Н. Курбанов, В. Р. Беляев, М. И. Свистунов, Е. А. Бутузова,  
Д. А. Солодовников, Н. А. Таратунина, Т. А. Янина*

403

---

## ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

Водный кризис Индии: некусусно-региональная концепция решения

*Г. В. Сдаюк, Н. Н. Алексеева*

420

---

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Интегральная оценка антропогенного воздействия на Байкальской природной территории: методические подходы и типология муниципальных районов

*Е. В. Антонов, Ю. Р. Беляев, В. Р. Битюкова, А. В. Бредихин, В. С. Дехнич,  
Е. А. Еременко, Н. А. Колдобская, О. Е. Прусихин, С. Г. Сафронов*

430

---

## ИСТОРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ НАУКИ

Вклад А.Е. Слуки в развитие отечественной социально-экономической географии зарубежного мира

*В. А. Колосов, Н. А. Слука*

448

---

---

# Contents

---

---

Volume 87, No. 3, 2023

---

---

## Theory and Social Functions of Geography

Axiomatic Foundation of the Central Place Theory: Revision from the Position of the Russian Scientific School

*R. V. Dmitriev and V. A. Shuper*

339

---

## Territorial Organization of Society

The Structure of the Unified Energy System of Russia in the Post-Soviet Period

*Z. A. Ataev*

348

Evaluation of Conditions and Factors for the Formation of Regional Air Hubs in Yekaterinburg, Tyumen, Novosibirsk and Krasnoyarsk

*O. V. Sorokin and A. S. Voloshok*

358

---

## Natural Processes and Dynamics of Geosystems

Landscape Invariants—Order Parameters of a Dynamic System

*A. S. Baibar, M. Yu. Puzachenko, R. B. Sandler, and A. N. Krenke*

370

The Climate of Zonal Plain Landscapes of Russia during the Modern Global Warming in Summer

*T. B. Titkova and A. N. Zolotokrylin*

391

---

## Evolution of Natural Systems

New Data on the Age of the Early Khvalynian Transgression of the Caspian Sea

*R. N. Kurbanov, V. R. Belyaev, M. I. Svistunov, E. A. Butuzova,  
D. A. Solodovnikov, N. A. Taratunina, and T. A. Yanina*

403

---

## Natural Resource Use and Geocology

Water Crisis in India: Concept of Nexus-Regional Solution

*G. V. Sdasyuk and N. N. Alekseeva*

420

---

## Regional Geographical Problems

Integral Assessment of Anthropogenic Impact on the Baikal Natural Territory: Methodological Approaches and Typology of Municipal Units

*E. V. Antonov, Yu. R. Belyaev, V. R. Bityukova, A. V. Bredikhin,  
V. S. Dehnich, E. A. Eremenko, N. A. Koldobskaya,  
O. E. Prusikhin, and S. G. Safronov*

430

---

## History of Geography

The Contribution of A.E. Sluka to the Development of Russian Human Geography of the Foreign World

*V. A. Kolosov and N. A. Sluka*

448

---

---

УДК 911.8

## АКСИОМАТИЧЕСКИЙ ФУНДАМЕНТ ТЕОРИИ ЦЕНТРАЛЬНЫХ МЕСТ: РЕВИЗИЯ С ПОЗИЦИЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ШКОЛЫ

© 2023 г. Р. В. Дмитриев<sup>a, b, \*</sup>, В. А. Шупер<sup>b, \*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт Африки РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*e-mail: dmitrievrv@yandex.ru

\*\*e-mail: vshuper@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.11.2022 г.

После доработки 06.02.2023 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

Статья посвящена уточнению аксиоматического фундамента теории центральных мест (ТЦМ) и выявлению возможностей и ограничений логического перехода в исследованиях от реальных систем расселения к системам центральных мест. Определена необходимость опоры на аксиомы ТЦМ в следующем виде: 1) пространство системы ЦМ не бесконечно, а конечно: основу каждой системы образует изолированная решетка; теория имеет дело с пространством физическим, а не математическим или географическим; 2) пространство однородно и изотропно во всех отношениях, за исключением распределения не только городского, но и сельского населения; 3) гексагональная решетка отвечает равновесному состоянию изолированной системы ЦМ как аттрактору; отклонения от шестиугольной формы – результат только внешнего воздействия на систему; 4) системы ЦМ полиморфны – могут существовать в модификациях как с одинаковым, так и с отличающимся для всех уровней иерархии и необязательно целочисленным значением  $K \in (1; 7]$ . Аксиома о “рациональном” поведении потребителя принимается при установлении иерархии ЦМ по объему выполняемых функций; при установлении их иерархии по людности – избыточна. В отличие от зарубежного подхода в ТЦМ, предполагающего перенос свойств идеальной системы центральных мест на реальную систему расселения, в рамках подхода российской школы осуществляется их сопоставление. Возможность последнего обусловлена принципом эквивалентности в релятивистском варианте теории, согласно которому формирование систем расселения в географическом пространстве происходит аналогично формированию систем ЦМ в физическом пространстве. В обоих случаях, если гравитационные эффекты скомпенсированы, нельзя отличить систему расселения от системы ЦМ, т.е. неоднородное и анизотропное географическое пространство от однородного и изотропно-го физического. Непосредственное следствие этого – эквивалентность, с одной стороны, людности поселений и центральных мест и, с другой, расстояний между ними в реальных системах расселения и системах центральных мест.

*Ключевые слова:* теория центральных мест, аксиома, принцип эквивалентности, географическое пространство, физическое пространство, изотропность, однородность, полиморфизм

DOI: 10.31857/S2587556623030068, EDN: QQYFII

### ВВЕДЕНИЕ

Исторически развитие теории центральных мест (ТЦМ) происходило по схеме восхождения от эмпирического к теоретическому уровню научного познания: наблюдение за поселениями – реальными объектами  $\Rightarrow$  переход к эмпирическим фактам и зависимостям через поселения – эмпирические объекты как “абстракции, выделяющие в действительности некоторый набор свойств и отношений вещей” (Степин, 2006, с. 158)  $\Rightarrow$  формулировка теоретических законов через поселения – идеализированные объекты, наделенные, в отличие от эмпирических, “не только теми признаками, ко-

торые мы можем обнаружить в реальном взаимодействии ..., но и признаками, которых нет ни у одного реального объекта” (Степин, 2006, с. 159).

В соответствии с этой схемой можно выделить два подхода в рамках исследований по ТЦМ. В основе первого из них лежит стремление исследователей как можно ближе подвести друг к другу в существенном отношении реальные поселения и центральные места – прежде всего, посредством усложнения математического аппарата: в уравнения ТЦМ вводятся новые коэффициенты, развитие систем центральных мест рассматривается как совокупность случайных процессов с привле-

чением теории вероятностей и пр. В методологическом отношении этот подход достаточно уязвим для критики, поскольку фактически предполагает тождество эмпирических и идеализированных объектов, эмпирического и теоретического уровней научного исследования. Таким образом, в ТЦМ вводится то, чего в ней изначально не было: для научного исследования в целом такая методика не всегда плоха, однако же ее целесообразность для случая ТЦМ нуждается в обосновании.

Второй подход предполагает, во-первых, концентрацию внимания исследователя на собственно ТЦМ с минимально возможными заимствованиями из других областей научного знания. Во-вторых, он сосредоточен в основном на третьей ступени представленной выше схемы – формулировке теоретических закономерностей.

Несмотря на сложность четкого разграничения двух подходов, в целом, можно говорить о преобладании первого из них в зарубежных исследованиях, а второго – в российских. Выполненная в рамках второго подхода, представленная работа направлена на уточнении аксиоматического фундамента ТЦМ и выявление возможностей и ограничений логического перехода в исследованиях от реальных систем расселения к системам ЦМ.

## МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По А.Д. Арманду, “систему можно считать полностью определенной, если перечислены элементы, входящие в нее, набор связей (структур), множество состояний, принимаемых ею, и траектория поведения в заданных условиях. Если одна из четырех характеристик отсутствует, то система задана не полностью” (1988, с. 10). ТЦМ определяет систему населенных пунктов следующим образом:

**1) элемент – ЦМ, обслуживающее себя и (в большинстве случаев) другие ЦМ.** В качестве такового в ТЦМ чаще всего выступает город, выполняющий центральные функции (в конечном счете сводящиеся к градообразующим и градообслуживающим) в отношении самого себя и своего окружения – дополняющего района. Последний, в свою очередь, состоит из городов, которые не имеют столь разветвленной системы центральных функций, а также сельских поселений, обслуживающих фактически лишь себя – да и то не в полной мере.

С этой характеристикой системы ЦМ связаны две аксиомы теории: о бесконечности пространства и о его однородности и изотропности. Первая из них устанавливает бесконечно большое число элементов решетки как в горизонтальном (без краевых эффектов), так и в вертикальном (в отношении иерархии) измерениях. Упрощенно – ре-

шетка имеет бесконечную площадь и содержит бесконечно много иерархически выстроенных ЦМ. Второе выполняется также и в том случае, если мы возьмем для рассмотрения ограниченный участок бесконечной в горизонтальном отношении решетки. Аксиома об однородности и изотропности пространства определяет одинаковость его свойств, во-первых, во всех точках (кроме собственно ЦМ) и, во-вторых, по всем направлениям: в рамках классической ТЦМ это означает равномерность размещения сельского населения, или, упрощенно, то, что сельские поселения не являются ЦМ.

**2) набор связей – иерархия ЦМ по численности населения или по объему предоставляемых услуг.** Степень диверсификации набора центральных функций предопределяет распределение ЦМ по этому показателю – от более богатых центральными функциями к менее богатым. ЦМ выстраиваются в иерархическую цепочку, образуя своего рода плоскую матрешечную систему с “вложением (суперпозицией) функций” (Черкашин, 2020, с. 15). Поскольку при прочих равных условиях “... существует прямая связь между величиной населения города и его значением в социально-экономической и культурной жизни” (Шатило, 2021, с. 4) (т.е. объемом центральных функций), иерархия ЦМ возникает и по их людности. Далее, если не указано иное – в аспекте принципа дополнительности (Шупер, 1996) – мы будем говорить прежде всего об иерархии ЦМ по численности населения, а не по объему выполняемых ими центральных функций. Указанный принцип заключается в том, что мы не можем для некоей существующей системы ЦМ одновременно зафиксировать и их иерархию по численности населения, и совокупность центральных функций по обслуживанию себя и дополняющих районов. Тем не менее две эти “составляющие” формирования решетки неразрывно друг с другом связаны, окончательно разделить их невозможно.

С одной стороны, эта характеристика обуславливает аксиому ТЦМ о “рациональном” поведении потребителя: все товары и услуги приобретаются в ближайшем из всех ЦМ, в которых они могут быть приобретены. С другой – определяет геометрию систем ЦМ параллельно с третьей характеристикой.

**3) множество состояний – полиморфизм решеток через показатель К.** В настоящее время существуют два общепризнанных способа введения и определения последнего. *Первый*, “наглядно-априорный”, непосредственно вытекает из аксиом ТЦМ и рисунка решетки. При этом К рассматривается как число центральных мест данного уровня иерархии, подчиненных одному центральному месту предыдущего, более высокого уровня иерархии, плюс оно само. Очевидно, в

этом случае  $K$  принимает лишь целочисленные значения, причем в классическом варианте ТЦМ возможны лишь три из них для случая бесконечной решетки: 3, 4 и 7 – то есть одному ЦМ данного уровня полностью подчинены соответственно  $6 \times \frac{1}{3} = 2$ ,  $6 \times \frac{1}{2} = 3$  и  $6 \times 1 = 6$  ЦМ следующего, более низкого уровня.

*Второй способ* определения  $K$  – геометрический. Он использовался А. Лёшем, где  $K$  трактуется как

$$K = \left(\frac{b}{a}\right)^2,$$

где  $b$  – “расстояние между двумя предприятиями одного типа” (для  $K = 4$   $b = 2a$ ),  $a$  – “расстояние между снабжаемыми поселениями”.

В случае регулярной решетки оба указанных способа идентичны с той лишь разницей, что, по Кристаллеру, значения  $K$  равны для всех уровней иерархии; по Лёшу же – наоборот, отличаются, поскольку экономический ландшафт представляет собой именно плоскую матрешечную систему экономических районов–решеток, геометрически выстроенных по мере увеличения их площади. Если у Кристаллера  $K$  может принимать только три значения, то у Лёша – сколь угодно много, каждое из которых определяется (Dacey, 1966) диофантовым уравнением вида

$$K = x^2 + x \times y + y^2,$$

где  $x$  и  $y$  – целые положительные числа.

Из определения  $K$  Кристаллером и Лёшем вытекает *аксиома о полиморфизме систем ЦМ*. Таким образом, системы ЦМ могут существовать в разных модификациях, при этом в работах исследователей была установлена возможность существования систем и другой, отличной от Кристаллеровской структуры. Вероятно, для случаев  $K = 5$  и  $K = 6$  данное положение впервые было доказано зарубежными (Church and Bell, 1990), а для  $K = 2$  – отечественными (Важенин, 2001) исследователями. Однако обязательно ли значение  $K$  должно быть равным для всех уровней иерархии и при этом принимать только целочисленные значения?

*Аксиома о максимальной компактности зон* определяет шестиугольную форму решетки ЦМ. Как совершенно справедливо отмечает А.Д. Арманд, «формирование структур, подчиненных правилу плотнейшей упаковки, как правило, включает две стадии. Первая состоит в первоначальном “дележе” свободной территории между элементами системы, каждой бы природы они ни были» (1988, с. 105). Основной вопрос состоит в том, возникают ли однотипные поселения одновременно или в какой-то последовательности друг за другом? После возникновения первого (по

времени) ЦМ формируется его дополняющий район, постепенно ограничиваемый дополняющими районами других возникающих таких же поселений. По Августу Лёшу (2007), самой выгодной формой таких районов будет форма ячеек пчелиных сот<sup>1</sup>.

**4) траектория поведения системы – вплоть до настоящего времени этот пункт был самым слабым местом ТЦМ.** В докторской диссертации одного из авторов данной статьи (Дмитриев, 2022) было установлено, как происходит появление новых уровней иерархии и как эти уровни заполняются – при условии постоянства для всех уровней иерархии доли ЦМ в населении обслуживаемой им зоны. В работе “Самоорганизация городского населения” (Шупер, 1995) это положение было определено в качестве шестой аксиомы ТЦМ. Однако позднее, в одной из статей (Дмитриев, 2019а) эта аксиома была доказана, то есть перешла в разряд теорем: в соответствии с ней, доля каждого ЦМ в населении обслуживаемой им зоны постоянна для всех уровней иерархии, кроме последнего, и не превышает значения  $K - \sqrt{K^2 - K}$ . В этой связи далее мы попытаемся уточнить именно пять представленных выше аксиом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В решетках Кристаллера ЦМ, находящиеся на уровнях иерархии, обозначаются пунсонами, размер которых связан не с реальным (географическим/физическим) размером поселений, а именно с численностью их населения: чем больше размер пунсона, тем больше людность. Таким образом, поскольку “размерами и формой ... в условиях данной конкретной задачи можно пренебречь” (Кириченко, Крымский, 2013, с. 12), теория оперирует ЦМ как материальными точками, масса которых в качестве первого и важнейшего параметра самой теории выражается через людность. Таким образом, можно заключить, что *ТЦМ имеет дело с пространством физическим, а не: 1) математическим*, хотя в обоих случаях вторая характеристика системы ЦМ – расстояние между ними как функция людности – и будет определяться геометрически. При этом точки как элементы математического пространства вообще не имеют измеримых характеристик – в отличие от точек-элементов физического пространства; *2) географическим*, поскольку для последнего размеры и форма есть его суть, и ими пренебречь нельзя.

Это замечание принципиально важно в контексте аксиомы о бесконечности пространства.

<sup>1</sup> В 1990 г. была “доказана” следующая теорема: “Лучшая форма зоны влияния среди треугольников, квадратов и шестиугольников – это треугольник” (Drezner, 1990). В 1992 г. эта теорема была опровергнута и доказано преимущество именно шестиугольной формы (Gusein-Zade, 1992).

Представим, что физическое пространство в ТЦМ действительно бесконечно в части как числа структурных элементов, так и площади решетки. Однако же если масса физического тела гипотетически может быть неограниченно большой и неограниченно малой, то как поступить в этом случае с численностью населения ЦМ? Вероятно, она ограничена численностью людей как вида вообще (система представлена одним ЦМ), что делает решетку конечной “сверху”; и численностью населения одного ЦМ, равной 1 человеку, что делает решетку конечной “снизу”. Таким образом, аксиома ТЦМ о бесконечности пространства представляется противоречивой.

Даже если каждый сельский житель (а не только сельские поселения) будет представлен в пространстве материальной точкой, их число будет конечным. Иными словами, свойства пространства “между” сельскими жителями отличаются от таковых в той его части, которая занята сельскими жителями. Это приводит к противоречивости аксиомы об однородности пространства в части размещения сельского населения, то есть *чтобы эта часть аксиомы была непротиворечивой, сельские поселения также должны представлять собой ЦМ* – вероятно, последнего, самого низкого уровня иерархии. Это предположение было доказано в 2021 г. (Дмитриев, Горохов, 2021).

Поскольку далее мы будем рассматривать пространство в ТЦМ как конечное, то конечно и число ЦМ в его пределах. В классическом варианте теории все они расположены в узлах и на ребрах между или же внутри правильных шестиугольников. Возьмем для рассмотрения ЦМ 1-го уровня и проведем из него до границ решетки бесконечное множество отрезков на бесконечном множестве направлений. Согласно аксиоме об изотропности пространства, каждый отрезок должен пролегать между всеми ЦМ более низких уровней или по крайней мере проходить через одинаковое их число. Однако же, какой бы вариант решетки мы ни взяли, очевидно, что это положение соблюдается лишь в случае наличия только одного ЦМ 1-го уровня; появление еще хотя бы одного ЦМ делает не все направления одинаковыми. Можно подойти к этому вопросу и с другой стороны, используя определение изотропности пространства через поворот системы на определенный угол (Сивухин, 1979). В этом случае при “наложении” мельчайших рыночных зон происходит, как показал А. Лёш (2007, с. 174), расчленение пространства на участки, содержащие больше и меньше поселений. Иными словами, не все направления от ЦМ 1-го уровня оказываются одинаковыми – то есть налицо анизотропность.

Приведенные выше рассуждения в рамках аксиомы об однородности и изотропности пространства в ТЦМ приводят нас к весьма интерес-

ному выводу: поскольку однородность и изотропность пространства определяется через замкнутые (изолированные) системы<sup>2</sup>, любые внешние силы не оказывают влияния на системы ЦМ. Таким образом, их *формирование происходит исключительно за счет внутренних свойств самой системы; любые же внешние факторы не оказывают никакого влияния на ход этого процесса.*

Аксиома о “рациональном” поведении потребителя приводит к интересному выводу о невозможности извлечения сверхприбыли поставщика услуг в системах центральных мест (Лёш, 2007). Учитывая тот факт, что, во-первых, поселения с близкой, но отличающейся людностью вполне могут выполнять полностью идентичные центральные функции и, во-вторых, одинаковая людность поселений – скорее исключение, чем правило, *при установлении иерархии ЦМ по объему выполняемых функций эта аксиома принимается; при установлении иерархии ЦМ по людности – избыточна.*

Вопрос о целочисленности и при этом равенстве значений  $K$  для всех уровней иерархии непосредственно связан с вопросом об эволюции систем ЦМ. В одной из недавно опубликованных работ (Дмитриев, Горохов, 2022) было выведено следующее уравнение, определяющее функцию уровня урбанизированности:

$$\phi = 1 - (1 - k) \left[ \frac{K_{n-2}^p (1 - k)}{K_{n-2}^p - k} \right]^{(n-2)},$$

где  $\phi$  – доля городского населения в общей численности населения системы,

$k$  – доля ЦМ в населении обслуживаемой им зоны, постоянная для всех уровней иерархии, кроме последнего,

$K^p$  – коэффициент, эквивалентный максимально возможной численности населения в рамках выполнения одним ЦМ уровня иерархии ( $n - 2$ ) функций “градо”обслуживания (собственное население) и “градо”образования (население всех “принадлежащих” ему ЦМ ниже лежащих уровней),

$n$  – число уровней иерархии в системе, включая первый (представлен одним ЦМ) и последний (представлен в частном случае сельскими поселениями).

Судя по виду этого уравнения, в релятивистском варианте ТЦМ множество значений  $K^p \in (1; 7]$ ; в классическом варианте  $K^p$  переходит в традиционное  $K^c$  – число ЦМ следующего, более низкого уровня иерархии, обслуживаемых одним ЦМ более высокого уровня (уровни нумеруются сверху), плюс единица.

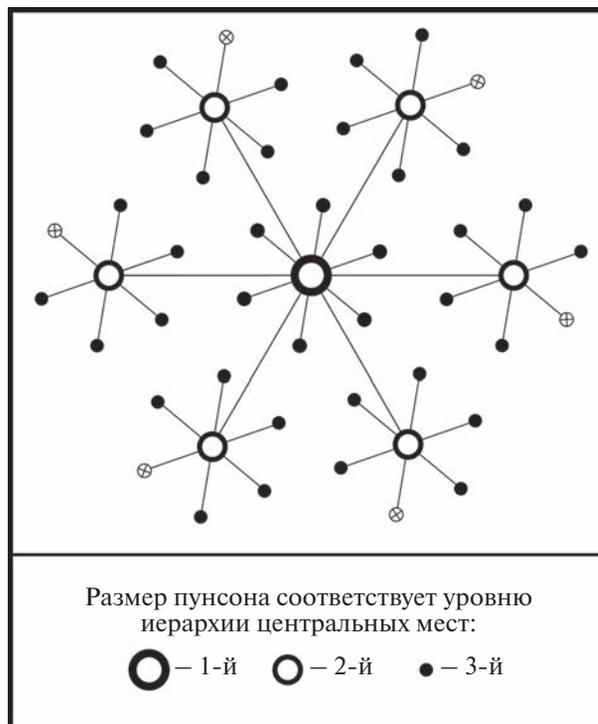
<sup>2</sup> Несмотря на возможные отличия, в случае ТЦМ эти понятия синонимичны по своей сути.

Представленные аксиомы определяют основные характеристики системы ЦМ: массу последних (в нашем случае — численность населения) и измеряемое по прямой расстояние между ними. Разумеется, в реальных системах расселения определяемые классической ТЦМ соотношения в численности населения и расстояниях — крайне редкое исключение. Естественным выходом из сложившейся ситуации видится представление реальных систем в форме систем ЦМ, то есть моделирование: реальные свойства систем расселения заменяются таковыми для систем ЦМ. Именно в этом случае возникают такие характеристики, как “идеализированная территория” (Иодо и др., 2015, с. 65), “изотропная равнина” (Ikeda and Murota, 2014, p. 5) и другие, исследования степени устойчивости симметричного распределения (Allen and Sanglier, 1979).

С сожалением констатируем, что идею при таком подходе в современных исследованиях в области ТЦМ (и не только) все более вытесняет метод (методика) как своего рода “ключ от всех дверей”. Повторяя в той или иной форме высказывание В. Кристаллера о том, что его “абстрактную ... модель ... в действительности ... нигде нельзя встретить в чистой форме” [цит. по: (Саушкин, 1973, с. 271)], многие исследователи пытаются “совместить” системы ЦМ и реальные системы расселения. Здесь и современные ГИС (Theo, 2011), и трансформация показателей (к примеру, “не просто средние значения расстояний от главного центра до остальных центральных мест, а средневзвешенные по населению” (Худяев, 2010)<sup>3</sup>, и привлечение конструкторов вроде правила “ранг–размер” (Liu H. and Liu W., 2009), и попытка учета особенностей рельефа (Vionis and Pantoniou, 2019), и пр.

Такой подход весьма уязвим для критики, а по сути — вообще не имеет смысла: напомним, что ТЦМ имеет дело с физическим пространством, в то время как реальные системы расселения располагаются в пространстве географическом. Они отличаются друг от друга как минимум в отношении свойства однородности и изотропности, поэтому рассматривать в этом контексте “идеализированную территорию” или “однородную равнину” — то же самое, что пытаться одновременно сделать из, с одной стороны, однородного и изотропного пространства и, с другой, неоднородного и анизотропного нечто среднее — “полуоднородное и полуизотропное”.

<sup>3</sup> Это уточнение совершенно излишне, поскольку в этом случае в рамках расчета показателя изостатического равновесия сравниваться между собой будут не идеальная и реальная структуры, а идеальная и неким образом преобразованная реальная — с приведенными к идеальному расстояниям при расчете эмпирического радиуса. Подобное приведение лишает сравнение всякого смысла.



**Рис. 1.** Структура решетки, соответствующей идеальной системе ЦМ на последнем этапе ее эволюции при  $K = 7$ .

*Примечание:* пунсонами с темной заливкой показаны оптимальные для возникающих ЦМ локусы на 3-м уровне иерархии; без заливки и со скрещенными линиями внутри — терминальные. Подробнее см. (Дмитриев, 2022).

В основе подхода российской школы ТЦМ лежит не попытка свести друг с другом физическое и географическое пространство, а именно сравнение их характеристик в рамках систем ЦМ и реальных систем расселения. Система ЦМ выступает в качестве базы сравнения — своего рода образца: расстояния при этом также измеряются по прямой, а сравнение численности населения, учитывая неодинаковость людности реальных поселений, проводится по уровням иерархии, а не по отдельным ЦМ. Соответствие реальной системы расселения системе ЦМ и степень устойчивости оцениваются количественно с помощью показателя изостатического равновесия.

Популяционная структура системы расселения весьма динамична: людность уровней иерархии — не говоря уже о людности отдельных поселений — может изменяться с течением времени достаточно сильно. При этом пространственная структура гораздо более инерционна вследствие изостатического равновесия — компенсации самой системой возникающих отклонений в людности и расстоянии между поселениями от соответствующих значений, определяемых теорией

Таблица 1. Аксиомы теории центральных мест

Аксиома	Формулировки аксиом классической ТЦМ [приводятся по: (Шупер, 1995, с. 70–73)]	Авторские формулировки ТЦМ
О конечности/бесконечности пространства	Пространство бесконечно: из решетки не может быть выделен какой-либо фрагмент – в противном случае возникнут краевые эффекты	Пространство конечно: основу каждой системы ЦМ образует изолированная решетка. ТЦМ имеет дело с пространством физическим, а не математическим или географическим
Об однородности и изотропности пространства	Пространство однородно и изотропно во всех отношениях, за исключением распределения городского населения; сельское население размещено равномерно	Пространство однородно и изотропно во всех отношениях, за исключением распределения городского и сельского населения
О максимальной компактности зон	Системы центральных мест образуют правильную гексагональную решетку вследствие того, что шестиугольник – наиболее близкая к кругу геометрическая фигура, допускающая плотную упаковку на плоскости	Гексагональная решетка отвечает равновесному состоянию изолированной системы центральных мест как аттрактору. Отклонения от шестиугольной формы – результат внешнего воздействия на систему
О принципе оптимизации	Системы центральных мест полиморфны – могут существовать в модификациях с одинаковым для всех уровней иерархии $K = 3$ , или $K = 4$ , или $K = 7$	Системы центральных мест полиморфны – могут существовать в модификациях как с одинаковым, так и с отличающимся для всех уровней иерархии $K \in (1; 7]$
О “рациональном” поведении потребителя	Все товары и услуги приобретаются в ближайшем из всех центральных мест, в которых они могут быть приобретены	<i>В соответствии с принципом дополнительности: при установлении иерархии ЦМ по объему выполняемых функций аксиома принимается; при установлении иерархии ЦМ по людности – избыточна</i>

Примечание. Курсивом выделены авторские уточнения.

для системы ЦМ. Для изолированных (самостоятельных) систем ЦМ значение показателя изостатического равновесия равно

$$\sum_{n=2}^{n-1} \frac{R_n^f}{R_n^e}$$

где  $R_n^f$  – теоретический радиус, отражающий соотношения в численности населения уровней иерархии,

$R_n^e$  – эмпирический радиус, отражающий соотношения в расстояниях.

Методика его вычисления подробно изложена в ранее опубликованной работе одного из авторов данной статьи (Шупер, 1995). Чем ближе расчетное значение показателя изостатического равновесия к значению числа уровней иерархии системы за вычетом первого и последнего –  $(n - 2)$ , тем более последняя устойчива – стабильна, или равновесна<sup>4</sup>. То есть тем более уравновешены гравитационные эффекты, связанные с отличием в людности и расстояниях между ЦМ в этой системе и в соответствующей ей идеальной кристаллической решетке.

Гексагональная решетка отвечает равновесному состоянию изолированной системы центральных мест как аттрактору<sup>5</sup>. Отклонения от шестиугольной формы, характерные для структуры систем расселения – результат внешнего воздействия. При этом численное решение вопроса выгодности той или иной формы выполняющих районов в решетке, строго говоря, не является необходимым. Это непосредственно следует из теорем проективной геометрии (Паскаля и Брианшона) и их вариаций: для запуска описываемой выше А.Д. Армандом первой стадии формирования структур, подчиненных правилу плотнейшей упаковки, необ-

Гексагональная решетка отвечает равновесному состоянию изолированной системы центральных мест как аттрактору<sup>5</sup>. Отклонения от шестиугольной формы, характерные для структуры систем расселения – результат внешнего воздействия. При этом численное решение вопроса выгодности той или иной формы выполняющих районов в решетке, строго говоря, не является необходимым. Это непосредственно следует из теорем проективной геометрии (Паскаля и Брианшона) и их вариаций: для запуска описываемой выше А.Д. Армандом первой стадии формирования структур, подчиненных правилу плотнейшей упаковки, необ-

<sup>4</sup> Стабильность и устойчивость используются нами в качестве синонимов (“stabilis” на латыни и означает “устойчивый”).

<sup>5</sup> Графическое изображение такой структуры соответствует  $K = 7$  для каждого уровня (рис. 1). Таким образом, системы, отвечающие разным значениям  $K$ , будут изображаться как части структуры, соответствующей завершению последнего этапа эволюции – своего рода трафарета, локусы которого будут занимать ЦМ по мере своего возникновения в процессе эволюции систем.

ходимы лишь три поселения — все остальные могут возникнуть позже и именно во вполне определенных точках, совокупность которых образует сотовую структуру (Дмитриев, 2019б).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трансформированные формулировки аксиом ТЦМ представлены в табл. 1. Таким образом, особенность подхода российской школы ТЦМ в конечном счете состоит в сопоставлении реальной системы расселения с системой ЦМ в рамках сравнения неоднородного и анизотропного географического пространства<sup>6</sup> систем расселения и однородного и изотропного физического пространства систем центральных мест. Собственно, российский подход в ТЦМ и отличается этим от зарубежного, в рамках которого происходит не сравнение, предполагающее наличие цели в эволюции систем, а “бесцельный” перенос свойств идеальной системы ЦМ на реальную систему расселения.

Здесь мы вплотную подходим к определению принципа эквивалентности в релятивистской ТЦМ, согласно которому формирование систем расселения в географическом пространстве происходит аналогично формированию систем центральных мест в физическом пространстве. В обоих случаях, если гравитационные эффекты (Дмитриев, 2012) скомпенсированы<sup>7</sup>, мы не сможем отличить систему расселения от системы центральных мест, то есть, в конечном счете, неоднородное и анизотропное географическое пространство от однородного и изотропного физического. Непосредственное следствие этого — эквивалентность, с одной стороны, людности поселений и ЦМ и, с другой, расстояний между ними в реальных системах расселения и системах ЦМ.

Этот принцип, вероятно, может считаться частным случаем принципа эквивалентности А. Эйнштейна<sup>8</sup> и свидетельствует об отсутствии необходимости приведения к “единому знаменателю” свойств систем расселения и систем центральных мест, практикуемого многими зарубежными специалистами в области ТЦМ: необходимо именно

<sup>6</sup> Хотя в отечественной традиции географическое пространство чаще всего наделяется одновременно свойствами континуальности и дискретности (Бакланов, 2013).

<sup>7</sup> Во втором случае (для традиционной кристаллеровской решетки) это условие справедливо всегда, в первом — если изменения людности поселений по отношению к предсказанной ТЦМ полностью уравниваются соответствующим изменением расстояния от них до крупнейшего по численности населения поселения системы.

<sup>8</sup> Согласно которому “все физические явления протекают совершенно одинаково в инерциальной системе отсчета  $K_0$ , в которой имеется однородное поле тяготения с ускорением силы тяжести  $g$ , и в равномерно ускоренной системе  $K_a$ , движущейся с ускорением  $-g$  относительно инерциальной системы отсчета без поля тяготения” [цит. по: (Логунов и др., 1996, с. 81)].

сравнение степени их устойчивости — в частности через показатель изостатического равновесия.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в Институте географии РАН по теме государственного задания ИГ РАН АААА-А19-119022190170-1 (FMGE-2019-0008).

## FUNDING

The article was prepared within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, no. АААА-А19-119022190170-1 (FMGE-2019-0008).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арманд А.Д. Самоорганизация и саморегулирование географических систем. М.: Наука, 1988. 264 с.
- Бакланов П.Я. Подходы и основные принципы структуризации географического пространства // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 5. С. 7–18.
- Важенин А.А. Эволюция городского расселения: необходимость критического анализа теории центральных мест // Вторые сократические чтения по географии. М.: Изд-во УРАО, 2001. С. 85–89.
- Дмитриев Р.В. Использование гравитационных моделей для пространственного анализа систем расселения // Народонаселение. 2012. № 2 (56). С. 41–47.
- Дмитриев Р.В. К вопросу о постоянстве значения доли центрального места в населении обслуживаемой им зоны для всех уровней кристаллеровской иерархии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019а. № 1. С. 128–135. <https://doi.org/10.31857/S2587-556620191128-135>
- Дмитриев Р.В. Метрика пространства в теории центральных мест: старые проблемы, новые решения // Географический вестник. 2019б. № 2 (49). С. 24–34. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-2-24-34>
- Дмитриев Р.В. Эволюционные процессы в системах центральных мест: Дис. ... д-ра геогр. наук. М.: Институт географии РАН, 2022. 223 с.
- Дмитриев Р.В., Горохов С.А. Сельское население в системах центральных мест // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Т. 7. № 3. С. 26–33. <https://doi.org/10.37279/2309-7663-2021-7-3-26-33>
- Дмитриев Р.В., Горохов С.А. Системы центральных мест: континуальное развитие на ранних этапах // Пространственная экономика. 2022. Т. 18. № 2. С. 38–55. <https://doi.org/10.14530/se.2022.2.038-055>
- Иодо И.А., Протасова Ю.А., Сысоева В.А. Теоретические основы архитектуры. Минск: Высшая школа, 2015. 114 с.
- Кириченко Н.А., Крымский К.М. Общая физика. Механика. М.: МФТИ, 2013. 290 с.
- Лёш А. Пространственная организация хозяйства. М.: Наука, 2007. 663 с.
- Логунов А.А., Мествиришвили М.А., Чугреев Ю.В. О неправильных формулировках принципа эквивалентности // Успехи физических наук. 1996. Т. 166.

- № 1. С. 81–88.  
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199601d.0081>
- Саушкин Ю.Г. Экономическая география: история, теория, методы, практика. М.: Мысль, 1973. 557 с.
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1. Механика. М.: Наука, 1979. 520 с.
- Степин В.С. Философия науки. Общие проблемы. М.: Гардарики, 2006. 384 с.
- Худяев И.А. Эволюция пространственно-иерархической структуры региональных систем расселения: Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010. 161 с.
- Черкашин А.К. Иерархическое моделирование эпидемической опасности распространения нового коронавируса COVID-19 // Проблемы анализа риска. 2020. Т. 17. № 4. С. 10–21.  
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2020-17-4-10-21>
- Шатило Д.П. Трансформация социального пространства глобальных городов. М.: ИНИОН РАН, 2021. 78 с.  
<https://doi.org/10.31249/citispace/2021.00.00>
- Шупер В.А. Самоорганизация городского расселения. М.: Российский открытый университет, 1995. 168 с.
- Шупер В.А. Принцип дополнительности и теория центральных мест // Изв. РАН. Сер. геогр. 1996. № 4. С. 88–94.
- Allen P., Sanglier M. A Dynamic Model of Growth in a Central Place System // Geogr. Analysis. 1979. Vol. 11. № 3. P. 256–272.  
<https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1979.tb00693.x>
- Church R.L., Bell T.L. Unpacking Central Place Geometry I: Single Level Theoretical k Systems // Geogr. Analysis. 1990. Vol. 22. № 2. P. 95–115.  
<https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1990.tb00198.x>
- Dacey M.F. A Probability Model for Central Place Locations // Annals of the Association of American Geographers. 1966. Vol. 56. № 3. P. 550–568.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1966.tb00579.x>
- Drezner Z. A Note on the Location of Medical Facilities // J. Reg. Sci. 1990. Vol. 30. № 2. P. 281–286.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.1990.tb00098.x>
- Gusein-Zade S.M. Comment on “A Note on the Location of Medical Facilities” by Z. Drezner // J. Reg. Sci. 1992. Vol. 32. № 2. P. 229–231.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.1992.tb00180.x>
- Ikedo K., Murota K. Bifurcation Theory for Hexagonal Agglomeration in Economic Geography. Tokyo: Springer, 2014. 313 p.
- Liu H., Liu W. Rank-Size Construction of the Central Place Theory by Fractal Method and Its Application to the Yangtze River Delta in China // 2009 Int. Conference on Management and Service Science.  
<https://doi.org/10.1109/ICMSS.2009.5301777>
- Theo L. Simplifying Central Place Theory Using GIS and GPS // J. Geography. 2011. Vol. 110. № 1. P. 16–26.  
<https://doi.org/10.1080/00221341.2010.511244>
- Vionis A.K., Papantoniou G. Central Place Theory Reloaded and Revised: Political Economy and Landscape Dynamics in the Longue Durée // Land. 2019. Vol. 8. № 2.  
<https://doi.org/10.3390/land8020036>

## Axiomatic Foundation of the Central Place Theory: Revision from the Position of the Russian Scientific School

R. V. Dmitriev<sup>1, 2, \*</sup> and V. A. Shuper<sup>2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>*Institute for African Studies, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\*e-mail: [dmitrievrv@yandex.ru](mailto:dmitrievrv@yandex.ru)

\*\*e-mail: [vshuper@yandex.ru](mailto:vshuper@yandex.ru)

The article is devoted to clarifying the axiomatic foundation of the central place theory (CPT) and identifying the possibilities and limitations of the logical transition in research from real settlement systems to central place systems. The necessity of relying on the CPT axioms is determined in the following form: (1) the space of the CP system is not infinite, but finite: the basis of each system is formed by an isolated lattice; theory deals with physical space, not mathematical or geographical; (2) space is homogeneous and isotropic in all respects, with the exception of the distribution of not only the urban, but also the rural population; (3) the hexagonal lattice corresponds to the equilibrium state of an isolated CP system as an attractor; deviations from the hexagonal shape are the result of only external influence on the system; (4) CP systems are polymorphic—they can exist in modifications both with the same and with different values of  $K$ -parameter  $\in (1; 7]$  for all levels of the hierarchy. The axiom about the “rational” behavior of the consumer is accepted when establishing the hierarchy of the CP in terms of the functions performed; when establishing their hierarchy in terms of population, it is redundant. In contrast to the foreign approach to CPT, which involves the transfer of the properties of an ideal CP system to a real settlement system, within the framework of the Russian school approach, they are compared. The possibility of the latter is due to the equivalence principle in the relativistic version of the theory: the formation of settlement systems in geographic space occurs similarly to the formation of CP systems in physical space. In both cases, if the gravitational effects are compensated, it is impossible to distinguish the settlement system from the CP system, that is, a heterogeneous and anisotropic geographic space from a homogeneous and isotropic physical one. The immediate consequence of this is the equivalence, on the one hand, of the population size of settlements and population size of central places, and, on the other hand, of the distances between them in real settlement systems and CP systems.

**Keywords:** central place theory, axiom, equivalence principle, geographic space, physical space, isotropy, homogeneity, polymorphism

## REFERENCES

- Allen P., Sanglier M. A dynamic model of growth in a central place system. *Geogr. Anal.*, 1979, vol. 11, no. 3, pp. 256–272.  
<https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1979.tb00693.x>
- Armand A.D. *Samoorganizatsiya i samoregulirovanie geograficheskikh system* [Self-Organization and Self-Regulation in Geographic Systems]. Moscow: Nauka Publ., 1988. 264 p.
- Baklanov P.Ya. Approaches and general principles of structuring of geographical space. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2013, no. 5, pp. 7–18. (In Russ.).
- Cherkashin A.K. Hierarchical epidemic risk modeling of spreading new COVID-19 coronavirus. *Probl. Analiza Riska*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 10–21. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2020-17-4-10-21>
- Chugreev Yu.V., Logunov A.A., Mestvirishvili M.A. On noncorrect formulations of equivalence principle. *Uspekhi Fiz. Nauk*, 1996, vol. 39, no. 1, pp. 73–79. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.1070/PU1996v039n01ABEH000128>
- Church R.L., Bell T.L. Unpacking central place geometry I: single level theoretical k systems. *Geogr. Anal.*, 1990, vol. 22, no. 2, pp. 95–115.  
<https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1990.tb00198.x>
- Dacey M.F. A probability model for central place locations. *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 1966, vol. 56, no. 3, pp. 550–568.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1966.tb00579.x>
- Dmitriev R.V. Application of gravity models to spatial analysis of settlement systems. *Narodonaselenie*, 2012, no. 2 (56), pp. 41–47. (In Russ.).
- Dmitriev R.V. Is the share of a central place in the population of the area, served by this central place, a constant for all levels of the Christaller's hierarchy? *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 1, pp. 128–135. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S2587-556620191128-135>
- Dmitriev R.V. Metrics of urban settlement systems in terms of the central place theory: constancy vs variability. *Geogr. Bull.*, 2019, no. 2 (49), pp. 24–34. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-2-24-34>
- Dmitriev R.V. Evolutionary Processes in Systems of Central Places. *Dr. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Institute of Geography RAS, 2022. 223 p. (In Russ.).
- Dmitriev R.V., Gorokhov S.A. Rural population of central place systems. *Geopolitika i Ekogeodinamika Reg.*, 2021, vol. 7, no. 3, pp. 26–33. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.37279/2309-7663-2021-7-3-26-33>
- Dmitriev R.V., Gorokhov S.A. Central place systems: early stages of the continual development. *Prostranstvennaya Ekon.*, 2022, vol. 18, no. 2, pp. 38–55. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.14530/se.2022.2.038-055>
- Drezner Z. A note on the location of medical facilities. *J. Reg. Sci.*, 1990, vol. 30, no. 2, pp. 281–286.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.1990.tb00098.x>
- Gusein-Zade S.M. Comment on “A note on the location of medical facilities” by Z. Drezner. *J. Reg. Sci.*, 1992, vol. 32, no. 2, pp. 229–231.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.1992.tb00180.x>
- Ikeda K., Murota K. *Bifurcation Theory for Hexagonal Agglomeration in Economic Geography*. Tokyo: Springer, 2014. 313 p.
- Iodo I.A., Protasova Yu.A., Sysoeva V.A. *Teoreticheskie Osnovy Arkhitektury* [Theoretical Foundations of Architecture]. Minsk: Vysshaya shkola, 2015. 114 p.
- Khudyaev I.A. Evolution of the spatial-hierarchical structure of regional settlement systems. *Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2010. 161 p.
- Kirichenko N.A., Krymskii K.M. *Obshchaya Fizika. Mekhanika* [General Physics. Mechanics]. Moscow: MIPT, 2013. 290 p.
- Lösch A. *Die räumliche Ordnung der Wirtschaft*. Jena, 1940. 348.
- Liu H., Liu W. Rank-size construction of the central place theory by fractal method and its application to the Yangtze river delta in China. In *2009 International Conference on Management and Service Science*.  
<https://doi.org/10.1109/ICMSS.2009.5301777>
- Saushkin Yu.G. *Ekonomicheskaya Geografiya: Istoriya, Teoriya, Metody, Praktika* [Economic Geography: History, Theory, Methods, Practice]. Moscow: Mysl' Publ., 1973. 557 p.
- Shatilo D.P. *Transformation of the Global Cities' Social Space*. Moscow: INION RAS, 2021. 78 p.  
<https://doi.org/10.31249/citispace/2021.00.00>
- Shuper V.A. *Samoorganizatsiya gorodskogo rasseleniya* [Self-organization of Urban Settlement Pattern]. Moscow: Rossiiskii Otkrytyi Univ., 1995. 168 p.
- Shuper V.A. The principle of complementarity and the central place theory. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1996, no. 4, pp. 88–94. (In Russ.).
- Sivukhin D.V. *Obshchii Kurs Fiziki. T. 1. Mekhanika* [General Course of Physics. Vol. 1. Mechanics]. Moscow: Nauka Publ., 1979. 520 p.
- Stepin V.S. *Filosofiya Nauki. Obshchie problemy* [Philosophy of Science. Common Problems]. Moscow: Gardariki, 2006. 384 p.
- Theo L. Simplifying central place theory using GIS and GPS. *J. Geogr.*, 2011, vol. 110, no. 1, pp. 16–26.  
<https://doi.org/10.1080/00221341.2010.511244>
- Vazhenin A.A. The evolution of urban settlement: the need for a critical analysis of the theory of central places. In *Vtorye sokraticheskie chteniya po geografii* [Second Socratic Readings in Geography]. Moscow: URAO Publ., 2001, pp. 85–89.
- Vionis A.K., Papantoniou G. Central place theory reloaded and revised: political economy and landscape dynamics in the Longue Durée. *Land*, 2019, vol. 8, no. 2.  
<https://doi.org/10.3390/land8020036>

УДК 911.3:33

## СТРУКТУРА ЕДИНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ РОССИИ В ПОСТСОВЕТСКИЙ ПЕРИОД

© 2023 г. З. А. Атаев\*

Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина, Рязань, Россия

\*e-mail: [ataev-rzn@ya.ru](mailto:ataev-rzn@ya.ru)

Поступила в редакцию 19.02.2022 г.

После доработки 13.02.2023 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

В статье рассматривается Единая энергосистема (ЕЭС) России с точки зрения ее современного содержания и связности структурных частей. Показано, как исторически связаны закономерности развития энергетического пространства СССР и России. Главное внимание уделено географическому анализу изменений энергетического пространства в постсоветский период. Выявлено, что в ЕЭС выделяются три структурные части. По критерию отсутствия электрических связей для параллельной работы с иными системами выделена зона технологически изолированных (децентрализованных) энергосистем, т.е. ареал сетевой несвязности. По критерию синхронной работы (с общей частотой электрического тока) выделены еще две зоны. Первая синхронная зона включает шесть объединенных энергосистем. Географический анализ свидетельствует, что элементы слабой связи присущи всем энергосистемам и обусловлены трансформацией постсоветского пространства. Несвязность системы Северо-Запада определяется автономным функционированием электроэнергетики Калининградской области. Энергосистема Юга базируется на транзите электроэнергии по территории Украины. Возможный разрыв связи снизит устойчивость европейского сегмента ЕЭС России, высоки риски потери операционного выхода к Приднестровью, Молдавии и юго-западному сегменту энергосистемы Европы. Поэтому актуальны капиталоемкие сетевые проекты в обход Украины. Энергосистема Урала обеспечивает связку Центр–Сибирь транзитом через Казахстан, нарушение которого угрожает сетевой несвязностью и рисками потери выхода в Центральную Азию. Вторая синхронная зона ЕЭС включает одну объединенную энергосистему Востока, которая функционирует параллельно, но не синхронно с первой зоной (слабая сетевая связь). Энергосистема Востока имеет узкий спектр межсистемной связи, но очень перспективна для интеграции с энергосистемой Китая.

*Ключевые слова:* единая энергосистема, объединенная энергосистема, изолированная энергосистема, межсистемная связь энергосистем, синхронная зона, устойчивость энергосистемы, Россия, постсоветский период

DOI: 10.31857/S2587556623030044, EDN: QQUMPN

### ВВЕДЕНИЕ

*Постановка проблемы.* Единство времени производства–потребления электроэнергии определяет формирование специфичных систем и энергетического пространства, что подразумевает морфологические, структурные, функциональные особенности и свойства энергетической системы, формирующие (наряду с другими звеньями инфраструктуры, расселения, частично производства) каркас социально-экономических систем разного масштаба и ранга. Иными словами, энергетическое пространство – это энергетический каркас территориальной организации общества (Атаев, 2008). Территориальная организация общества практически совпадает с системой расселения (Ридевский, 2022, с. 14).

Географическое исследование структуры Единой энергосистемы СССР и особенно современной России не имеет обширной библиографии (Горлов, 2011; Хрушев, 2010). Анализ работ по теме показывает, что это сфера доминирующего интереса экономистов и энергетиков (Данилова, 2009; Корнюхова, 2013; Мелентьев, 1987; Подковальников и др., 2015; Проблемные ..., 2005; Фомина, 2008; Чайка, 2013; Энергетика СССР ..., 1987; и др.). С распадом СССР возникли вызовы единства энергетического пространства и одновременно предпосылки для новой интеграции. Отсюда объект исследования – структура Единой энергосистемы (ЕЭС) России в условиях трансформации постсоветского пространства. Цель настоящего исследования: выявление связности

структурных частей ЕЭС России и ее постсоветских изменений.

*Методика исследования.* В работе используются традиционные методы исследования: картографический, статистический, элементы системного анализа. Преобладает географический анализ рангов отраслевого пространства: ЕЭС России и ее структурные части (объединенные энергосистемы). В основе выделения структурных частей лежит методика зонирования (Алаев, 1983). По критерию отсутствия связей для параллельной работы с иными системами выделена зона технологически изолированных (децентрализованных) энергосистем. По критерию возможности параллельной и синхронной работы (с общей частотой электротока) выделены еще две пространственные зоны.

*Материалы исследования* включают фактические данные ЕЭС России и ее филиалов. При отборе материала ставка делалась на первоисточники: отраслевая статистика, региональные схемы и программы развития, картографический материал и др. (по состоянию на 1 января 2021 г.). Использован понятийный аппарат отраслевого стандарта России<sup>1</sup>.

*Единая энергосистема* – совокупность объединенных энергосистем, соединенных межсистемными связями, охватывающими значительную часть территории страны при общем управлении и режиме работы. *Объединенная энергосистема* – это совокупность нескольких энергосистем, объединенных общим режимом работы, имеющая общее диспетчерское управление. *Изолированная энергосистема* – не имеющая электросвязей для параллельной работы с другими энергосистемами. *Межсистемная связь энергосистем* – участок линии электропередачи, непосредственно соединяющий электростанции или подстанции разных энергосистем. *Синхронная зона* – совокупность синхронно работающих энергосистем генерирующего оборудования, имеющих общую частоту тока.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Единая энергосистема СССР* формировалась как вертикально интегрированная система, что учитывало саму природу электроэнергии: время ее производства должно синхронно совпадать со временем потребления. Поэтому под централизованным управлением были сосредоточены все функциональные цепочки: производство, передача, сбыт и потребление электроэнергии (Энергетика СССР ..., 1987).

<sup>1</sup> ГОСТ Р 57114-2016. Национальный стандарт Российской Федерации “Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы, термины и определения” (введен в действие 01.06.2017 г.). <http://www.docs.cntd.ru/document/1200139922> (дата обращения 30.01.2022).

Единая энергосистема СССР была одной из крупнейших в мире (1989 г.): установленная мощность электростанций – 341 ГВт; производство электроэнергии – 1722 млрд кВт ч; длина линий электропередач 35–800 кВ почти 1025 тыс. км (Народное ..., 1989). Структурно ЕЭС Советского Союза состояла из 11 объединенных энергосистем: Северо-Запада, Центра, Юга, Поволжья, Северного Кавказа, Урала, Сибири, Дальнего Востока, Северного Казахстана, Средней Азии и Закавказья (Мелентьев, 1987).

Концентрация производства оставалась важнейшим направлением развития электроэнергетики Советского Союза (Хрущев, 2010, с. 98), что обрекало энергосистемы на наращивание протяженных электросетей. Здесь показательны результаты сравнительного анализа факторов развития энергосистем в СССР и США. В Советском Союзе наблюдалось хроническое отставание темпов ввода сетей от требований развития зональных энергосистем, а фактором формирования их конфигурации являлось размещение крупных электростанций. В США широкое распространение получила практика строительства средних электростанций с узкой операционной зоной обслуживания (Файбисевич, Зейлигер, 1990).

Конфигурация ЕЭС СССР позволяла связать в параллельной и синхронной работе энергосистемы стран восточной и южной Европы (через Украину и Белоруссию). В 1962 г. была создана энергосистема “Мир” в рамках Совета экономической взаимопомощи (СЭВ): СССР, Болгария, Польша, Венгрия, Румыния, Чехословакия, ГДР. Таким образом, к началу 1990-х годов границы западноевропейских энергетических объединений и их сетевых комплексов вплотную приблизились к оперативным границам функционирования ЕЭС СССР и энергосистемы “Мир”. Возникли объективные предпосылки для согласованной работы с Трансъевропейским объединением энергосистем (TESIS), что позволяло прогнозировать усиление межгосударственных связей в западном направлении (Бондаренко и др., 1991; Central-European ..., 1990; Central-European ..., 1991; Situation ..., 1990).

Анализ конфигурации ЕЭС СССР подтверждал перспективность расширения отраслевой интеграции и в Азии. Из Советского Союза осуществлялось электроснабжение части потребителей в Китае и Монголии. На юге энергосистема советского Закавказья вышла к границам Турции и Ирана, а энергосистема Средней Азии граничила с Афганистаном. Сложившиеся предпосылки таили в себе масштабные возможности для расширения интеграции. Уже в постсоветский период обсуждался проект энергетического кольца (PEACE): Россия–Япония–Южная Корея–КНДР–Китай–Россия (Подковальников и др.,

2015; Проблемные ..., 2005, с. 211–214; Энергетика XXI века ..., 2004).

После распада СССР из новых государств синхронную работу смогли обеспечить только энергосистемы России, Украины, Белоруссии, стран Балтии. В 1992 г. страны-бывшие члены СЭВ вышли из энергосистемы “Мир”, сохранив параллельную работу в рамках нового объединения стран Восточной Европы (CENTRAL). В 1995 г. они, опираясь на иностранные кредиты, начали реконструкцию национальной энергетики, и в 1999 г. CENTRAL была включена на параллельную работу с Западно-Европейской энергосистемой (UCPTE). В 2009 г. электроэнергетические комплексы 36 стран интегрировались в более масштабную общеевропейскую энергосистему ENTSO-E<sup>2</sup>.

*ЕЭС России.* После распада СССР началась реформа электроэнергетики России. В 1992 г. было организовано РАО “ЕЭС России” в форме естественной монополии на рынке производства, передачи и сбыта электроэнергии. Региональные энергосистемы также начали процесс акционирования<sup>3</sup>. В 2002 г. дан старт новому этапу реформы, его суть заключалась в создании множества компаний по функциональному признаку: сетевые, генерирующие, сбытовые. Важной задачей реформы было формирование Федерального оптового рынка электроэнергии и мощности, началась консолидация магистральных сетей в уставном фонде Федеральной сетевой компании (Данилова, 2009).

После отраслевой реформы наглядно проявились новые тенденции в пространственной организации электроэнергетики России: территориальный принцип был заменен на доминирующий принцип консолидации финансовых потоков (Горлов, 2011). Реформа не создала достаточные условия для решения ключевой задачи – создания конкурентного рынка электроэнергии и мощности (Корнюхова, 2013).

В 2008 г. РАО “ЕЭС России” прекратил свое существование. Сегодня электроэнергетика страны функционирует по схеме: конкурентная среда (генерация и сбыт)—частная собственность; диспетчеризация, передача (транспорт)—естественная монополия ОАО “Системный оператор ЕЭС России” (“СО ЕЭС России”).

На 1 января 2021 г. установленная мощность электростанций ЕЭС России составляла 245.3 ГВт (880 станций единичной мощностью минимум

5 МВт), производство электроэнергии – более 1047 млрд кВт ч. Сетевое хозяйство – свыше 490 тыс. км линий электропередач (110–750 кВ). Параллельно с ЕЭС России работают энергосистемы Азербайджана, Белоруссии, Грузии, Казахстана, Монголии, Украины и стран Балтии. Параллельно через Казахстан работают энергосистемы Центральной Азии (Киргизия, Узбекистан), а через Украину – Молдавии. Россия имеет связь с Абхазией и Южной Осетией. Через вставки постоянного тока осуществляется переток электроэнергии в Китай, Норвегию и Финляндию<sup>4</sup>. Структурно ЕЭС России состоит из 71 региональной энергосистемы и семи объединенных энергосистем (ОЭС): Северо-Запада, Центра, Юга, Средней Волги, Урала, Сибири и Востока. Каждая ОЭС имеет свои особенности локализации, содержания и структуры (Фомина, 2008). ОЭС имеют межсистемную связь, работают параллельно и образуют две специфичные зоны (по частоте тока). С учетом зоны изолированных энергосистем ЕЭС России включает три структурные части (рис. 1, табл. 1).

*Зона изолированных энергосистем России* почти совпадает с районами Крайнего Севера, в том числе в европейской части страны (Бердин и др., 2017; Иванов и др., 2021; Корчак, 2017; Орлов, 2022; Чайка, 2013). По территориально-технологическим и экономическим причинам четыре субъекта полностью изолированы от ЕЭС России: Камчатский край, Сахалинская и Магаданская области, Чукотский автономный округ. Частично к этой зоне относятся и отдельные районы Республики Саха (Якутия). Это огромные территории с экстремальными природно-климатическими условиями, где по причине удаленности и слабой доступности представлена очаговая структура расселения (0.37 чел./км<sup>2</sup>). В 2020 г. объем производства в зоне составил 10.6 млрд кВт ч, а потребление – 10.4 млрд кВт ч<sup>5</sup>.

Перспективы развития зоны изолированных энергосистем связаны с включением автономных энергетических районов на параллельную работу с ОЭС Востока. Так, в 2019 г. ряд районов Якутии вошли в состав Единой энергосистемы (впервые с 1980 г.)<sup>6</sup>.

*Первая синхронная зона ЕЭС России.* ОЭС Северо-Запада включает 10 субъектов (12.8 млн чел.).

<sup>2</sup> European Network of Transmission System Operators for Electricity. <https://www.entsoe.eu> (дата обращения 01.02.2022).

<sup>3</sup> Указ Президента Российской Федерации № 923 от 15.07.1992 г. “Об организации управления электроэнергетическим комплексом Российской Федерации в условиях приватизации”. М., 1992. 40 с. Приложения. <http://www.dase.carant.ru> (дата обращения 15.01.2022).

<sup>4</sup> Системный оператор ЕЭС России (СО ЕЭС России). Единая энергетическая система России. <http://www.so-ups.ru/functioning/ees/ups2021/> (дата обращения 10.01.2022).

<sup>5</sup> Мировая энергетика. Информационно-аналитический, энергетический сайт. Изолировано работающие энергосистемы России. <http://www.eeseaacc.org> (дата обращения 30.01.2022).

<sup>6</sup> Схема и программа развития электроэнергетики Республики Саха (Якутия) на 2020–2024 гг. <https://docs.cntd.ru/document/570789897> (дата обращения 04.02.2022).



**Таблица 1.** Синхронные зоны Единой энергосистемы России: операционная зона, связи и сальдо обмена электроэнергией, 2020 г.

Объединенная энергосистема (сальдо обмена, млрд кВт ч)	Субъект обмена электроэнергией (сальдо, млрд кВт ч)	Зона обслуживания (площадь, тыс. км <sup>2</sup> /население, млн чел.)
Первая синхронная зона Единой энергосистемы России		
ОЭС Северо-Запада (–14.154)	Финляндия (–2.965)	1544.4/12.8
	Норвегия (–0.032)	
	Эстония (+1.110)	
	Литва (–2.031)	
	Латвия (–0.751)	
	Беларусь (+0.343)	
	ОЭС Урала (+0.067)	
ОЭС Центра (+9.129)	ОЭС Центра (–9.895)	794.7/40.4
	Беларусь (–0.659)	
	Украина (–1.557)	
	ОЭС Северо-Запада (+9.895)	
	ОЭС Юга (+1.791)	
	ОЭС Средней Волги (–0.545)	
	ОЭС Урала (+0.204)	
ОЭС Средней Волги (–4.810)	Казахстан (+0.017)	450/19.5
	ОЭС Центра (+0.545)	
	ОЭС Урала (–2.409)	
ОЭС Юга (–2.181)	ОЭС Юга (–2.962)	618.3/26.5
	Украина (–2.584)	
	Казахстан (–0.078)	
	Азербайджан (+0.03)	
	Грузия (–0.268)	
	Южная Осетия (–0.146)	
	Абхазия (–0.306)	
	ОЭС Средней Волги (+2.962)	
ОЭС Центра (–1.791)		
ОЭС Урала (–0.445)	Казахстан (–1.579)	2380/24.6
	ОЭС Средней Волги (+2.409)	
	ОЭС Центра (–0.204)	
	ОЭС Сибири (–1.004)	
	ОЭС Северо-Запада (–0.068)	
ОЭС Сибири (+2.355)	Казахстан (+1.478)	4944.3/19
	Монголия (–0.272)	
	ОЭС Урала (+1.004)	
	ОЭС Востока (+0.145)	
Вторая синхронная зона Единой энергосистемы России		
ОЭС Востока (–3.205)	Китай (–3.060)	4457.4/5.1
	ОЭС Сибири (–0.145)	

*Примечание:* положительное сальдо (+) – прием электроэнергии в энергосистему, отрицательное сальдо (–) – выдача электроэнергии из энергосистемы.

*Составлено по данным официального сайта СО ЕЭС России (<http://www.so-ups.ru/functioning/ees/ups2021/> (дата обращения 10.01.2022)).*

Здесь высока доля крупных ТЭС и АЭС (87% мощности), потенциал гидроэнергетики недостаточен для регулирования нагрузки (12.5%). Поэтому ГРЭС работают в неэффективном режиме, отсюда низкий коэффициент использования установленной мощности – 38%. Регулирование нагрузки Северо-Запада достигается извне за счет транзита мощности, сальдо отрицательное (–14.154 млрд кВт ч). Серьезным дефектом несвязности Северо-Запада является Калининградская область (Атаев, 2018). Регион не имеет связи с ЕЭС России, в политике стран-соседей (Польша, страны Балтии) доминируют меры блокады. Не поддержан и вариант работы в составе ENTSO-E. Поэтому с 2014 г. ОАО “Янтарьэнерго” развивается как самостоятельная система, но она не отнесена к изолированной зоне из-за наличия сетевой связи с энергосистемой Литвы (см. рис. 1). Слабым звеном Северо-Запада являются протяженные сети, не выражена связь с Уралом (ЛЭП-220 кВ).

*Объединенная энергосистема Центра* включает 19 субъектов (40.4 млн чел.). Центр страны перенасыщен ГРЭС и АЭС (96.5% мощности). Потенциал гидроэнергетики не достаточен для регулирования нагрузки (3.5%). Поэтому ГРЭС вынуждены работать неэффективно, коэффициент использования мощности – 36.6%. Значимость Центра определяет широкие связи по обмену электроэнергией (+9.129 млрд кВт ч). Наибольшие объемы поступают из ОЭС Северо-Запада (+9.895 млрд кВт ч), актуально сооружение новой цепи ЛЭП-750 кВ. Требуется решения и проблема укрепления связности ОЭС Центра и Юга (в наличии ЛЭП-500 кВ, по две линии 110–220 кВ). Недостаточно усилена широтная межсистемная связь по линии Центр–Урал.

*Объединенная энергосистема Средней Волги* включает 9 субъектов (19.5 млн чел.). Для энергосистемы характерна высокая доля гидроэнергетики Волжско-Камского каскада (25.6% мощности). Потенциал ГЭС позволяет обеспечить перетоки электроэнергией, централизованно регулировать нагрузку объединенных энергосистем Центра, Юга, Урала и Казахстана (сальдо – 4.81 млрд кВт ч). ОЭС обеспечивает реверсный транзит электроэнергии по линии Центр–Урал–Сибирь (запад–восток).

*Объединенная энергосистема Юга* включает 15 субъектов (26.5 млн чел.). В структуре электропотребления самая большая доля коммунально-бытовой нагрузки и самая большая доля генерации на основе возобновляемых источников энергии (32% мощности с учетом потенциала ГЭС). Потенциал гидроэнергетики используется как сезонный регулятор нагрузки других энергосистем. В результате ГЭС не загружены, коэффициент использования мощности – 38.8%. Наблюдается

отрицательное сальдо обмена электроэнергией (–2.18 млрд кВт ч): наибольший с Украиной (отдает) и Средней Волги (получает). Связь между ОЭС Юга и Средней Волги слабая по пропускной способности (ЛЭП-500 кВ “Балаковская АЭС–Трубная”; ЛЭП-220 кВ “Балашовская–Хопер”, четыре ЛЭП-110 кВ). Доминирование связи Центр–Юг по территории Украины получило развитие еще в рамках СССР, что тогда имело географическое, техническое и экономическое основание. Сегодня это серьезный дефект несвязности ЕЭС России. В СССР Украина была основным “коридором” экспорта электроэнергии в Европу (через энергосистему “Мир”). На постсоветском пространстве Украина занимала второе место по отраслевому потенциалу: мощность свыше 54 ГВт, объем производства более 170 млрд кВт ч/год. Пропускная способность межсистемной связи Украины со странами Евросоюза была ниже, чем с Россией (Украина ..., 2003).

Отношения между Россией и Украиной усложнились, усилилась стагнация отраслевых связей, наметилась ориентация Украины на Евросоюз. С 2003 г. юго-запад Украины (“Бурштынский энергоостров”, 600 МВт) был отделен и синхронизирован с энергетикой Словакии (в составе общеевропейской системы ENTSO-E). Украина предпринимает меры для приведения своей энергетики в соответствие с требованиями ENTSO-E, строит магистральные ЛЭП 400–750 кВ в обход Молдавии и Приднестровья<sup>7</sup>. К началу 2022 г. созданы условия для изоляции Украины от ЕЭС России и интеграции с ENTSO-E в 2023 г.<sup>8</sup>

Такое развитие событий имеет следствием снижение устойчивости всего европейского сегмента ЕЭС России. Высоки риски потери выхода к Приднестровью, Молдавии, юго-западной части ENTSO-E, возникает угроза связности между ОЭС Центра и Юга России. Поэтому актуальны капиталоемкие сетевые проекты в обход Украины.

*Объединенная энергосистема Урала* включает 11 субъектов (24.6 млн чел.). По мощности и объему производства это самая крупная энергосистема России (ТЭС – 93%). Крупные ГРЭС и АЭС работают в базовой нагрузке энергосистемы, это наиболее эффективный режим эксплуатации для этого класса электростанций. Коэффициент использования установленной мощности для АЭС – 83%, ГРЭС – 49%. Таким образом, ГРЭС не выполняют функцию регулятора нагрузки. Урал имеет большую долю парогазовых и газотурбинных установок (ПГУ и ГТУ). Этот маневренный потенциал выступает регулятором нагрузки

<sup>7</sup> European Network of Transmission System Operators for Electricity. <https://www.entsoe.eu> (дата обращения 01.02.2022).

<sup>8</sup> На Украине намерены интегрироваться в европейскую энергосистему в 2023 году. <https://tass.ru/ekonomika/10540135> (дата обращения 31.01.2022).

энергосистемы, где минимальна доля ГЭС (3.58%).

Для энергосистемы Урала характерна сложная многокольцевая сеть и развитый межсистемный обмен электроэнергией с ОЭС Казахстана, Центра, Средней Волги, Северо-Запада и Сибири (сальдо –0.445 млрд кВт ч). Проблемное звено ОЭС Урала –слабая связь с ОЭС Северо-Запада (ЛЭП-220 кВ “Летка–Мураши”). Кроме того, слабая связь наблюдается по линии Урал–Сибирь (ЛЭП-500 кВ, четыре ЛЭП-220 кВ и три ЛЭП-110 кВ).

Основная связь между ОЭС Урала и Сибири проходит по территории Казахстана. Такой конфигурационный вариант был реализован в СССР в рамках единого государства. Еще в 1980-е годы предполагалось усиление связи строительством ЛЭП-1150 кВ: Итат–Барнаул–Экибастуз–Челябинск. Не завершено сооружение и электросети сверхвысокого напряжения Экибастуз–Тамбов (1500 кВ). Возможное изменение геополитической ориентации Казахстана может продуцировать крайне негативные последствия для устойчивости ЕЭС России.

С целью укрепления целостности ЕЭС России в 2015 г. была введена в эксплуатацию ЛЭП-500 кВ “Витязь (Тюмень)–Восход (Омск)”. Магистраль соединила ОЭС Урала и Сибири по территории России, не считая еще трех ЛЭП-110 кВ<sup>9</sup>. Межсистемная связь Урал–Сибирь в 2016 г. была усилена двухцепной ЛЭП-220 кВ Нижневартовская ГРЭС–Советско-Соснинская подстанция<sup>10</sup>. В результате уменьшилась зависимость от транзита через Казахстан. Сегодня объем обмена электроэнергией между энергосистемами Урала и Сибири (сравнительно с транзитом через Казахстан) соотносится как 1.0 : 1.5 (см. рис. 1). Дальнейшее усиление сетевой связи нивелирует проблему.

*Объединенная энергосистема Сибири* включает 12 регионов страны (19.0 млн чел.). Энергосистема занимает третье место в ЕЭС России по установленной мощности электростанций (53.1 ГВт). Из них 1/2 – это доля мощных ГЭС Ангаро-Енисейского каскада (26.5 ГВт). Коэффициент использования мощности ГЭС – 53%. Сибирский каскад функционально ориентирован на работу в базисе нагрузке, чем принципиально отличается от ГЭС в Европейской части страны (регуляторы нагрузки). Сибирские ГЭС обеспечивают генерацию дешевой электроэнергии для нужд цветной металлургии. Поэтому каскад гидроэлектростан-

ций не может использоваться для регулирования нагрузки крупных энергосистем европейского сегмента ЕЭС России, перенасыщенного мощными ТЭС и АЭС.

Протяженные транзитные сети – слабое место ОЭС Сибири. Серьезным дефектом является слабая связь с Уралом по России (см. выше). Особенностью ОЭС Сибири является узкий спектр межсистемных связей (Казахстан, Монголия, ОЭС Урала и Востока), при высоком объеме перетока электроэнергии (+2.355 млрд кВт ч). Связь с Монголией обеспечивает две ЛЭП-220 кВ. В случае расширения интеграции и роста объема поставок этого потенциала недостаточно. Связь с ОЭС Востока почти отсутствует.

*Вторая синхронная зона ЕЭС России* включает одну ОЭС Востока в составе 5 регионов страны (5.1 млн чел.). В структуре мощностей наблюдается относительное равенство между ТЭС – 58.5% и ГЭС – 41.5%. Показатели коэффициента использования мощности почти равнозначны (ТЭС – 47.4%, ГЭС – 41.8%). Производительность гидроэлектростанций потенциально выше, но лимитирована учетом интересов речного судоходства (Зейская ГЭС и Бурейская ГЭС). Энергосистема Востока имеет узкий спектр связей (Сибирь, Китай). Обмен с энергосистемой Сибири незначителен (всего 145 млн кВт ч), а сальдо с Китаем закрывается отрицательно (–3.06 млрд кВт ч).

ОЭС Востока не участвует в параллельной работе с первой зоной ЕЭС России. Слабая связь “запирает” мощности, что имеет негативные следствия в случае сбоя (аварии). Связь ОЭС Сибири и Востока представлена двумя магистралями. Первая тяговая ЛЭП-220 кВ идет вдоль Транссибирской железной дороги (северный транзит, 2000 км): тяговая ПС Якурим 500 кВ–ПС Таксимо 220 кВ–Нерюнгринская ГРЭС. Вторая тяговая ЛЭП-220 кВ проходит вдоль Байкало-Амурской магистрали (южный транзит, 2000 км): Читинская ТЭЦ-1–ПС Холбон–вторичная отпайка от ПС Могоча–ПС Сковородино 500 кВ<sup>11</sup>. Исходя из функционального назначения, обе тяговые сети крайне слабы для обеспечения межсистемной связи энергосистем Сибири и Востока. Необходимо сооружение минимум двухцепной ЛЭП-500 кВ для параллельной работы зон ЕЭС России.

## ВЫВОДЫ

Единая энергосистема СССР была перспективна для международной интеграции. Но она не была достроена и не стала функционально еди-

<sup>9</sup> Схема и программа развития электроэнергетики Тюменской области на 2021–2025 годы. <http://www.admtymen.ru> (дата обращения 15.01.2022).

<sup>10</sup> Схема и программа развития электроэнергетики Ханты-Мансийского автономного округа – Югры на период до 2025 года. <https://www.depjkke.admhmao.ru> (дата обращения 15.01.2022).

<sup>11</sup> Схема ЛЭП и электроснабжения России (актуальность данных январь 2022 г.). Интерактивная карта электроэнергетической системы на данных проекта OpenStreetMap. <http://www.freosm.ru> (дата обращения 24.01.2022).

ной и делилась на три части: зона изолированных энергосистем, европейская и восточная зона. После распада страны началось дробление ЕЭС СССР, до четверти потенциала осталась за рубежами России. Возникли новые вызовы единству энергического пространства и одновременно предпосылки для новой интеграции.

ЕЭС России унаследовала деление на три части. Зона изоляции не претерпела изменений. Перспективы ее развития связаны с включением энергорайонов на параллельную работу с ОЭС Востока. В восточном сегменте ЕЭС России обострилась проблема связности Сибирь–Восток (нужны новые ЛЭП 500 кВ). Актуальность проблемы может усилиться при реанимации проекта интеграционного кольца (PEACE): Россия–КНДР–Китай.

Серьезные структурные трансформации произошли в европейской части ЕЭС по контуру новообразованных границ. Калининградская область – это эксклав России. В результате “Янтарьэнерго” работает как автономное образование, потенциально перспективное для интеграции с общеевропейской энергосистемой.

Устойчивость европейского сегмента ЕЭС России зависит от транзита по Украине. В связи с усложнением отношений между странами неизбежен рост рисков: снижение связности ЕЭС России, потеря выхода к Молдавии (Приднестровью) и юго-западному сегменту европейской энергосистемы. Крайне актуальны сетевые проекты в обход Украины. Связь между ОЭС Урала и Сибири проходит по Казахстану. В случае изменения политики Казахстана снизится связность по линии Урал–Сибирь, высоки риски потери выхода в Центральную Азию. Усиление сетевой связи по России уже снизило зависимость от казахстанского транзита.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алаев Э.Б.* Социально-экономическая география: Понятийно-терминологический словарь. М.: Мысль, 1983. 350 с.
- Атаев З.А.* Географические основы локальной энергетики Центрального экономического района России: монография. Рязань: Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина, 2008. 284 с.
- Атаев З.А.* Изолированная энергосистема Калининградской области // Изв. РАН. Сер. геогр. 2018. № 1. С. 101–110.
- Бердин В.Х., Кокорин А.О., Юлкин Г.М., Юлкин М.А.* Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. 80 с.
- Бондаренко А.Ф., Бутинг Г.Д., Ляшенко В.С., Маркун и др.* Проблемы объединения энергосистем европейских стран // Электричество. 1991. № 11. С. 1–8.
- Горлов В.Н.* Новые тенденции в пространственной организации электроэнергетики России // Социально-экономическая география: история, теория, методы, практика: Сб. научных статей. Смоленск: Универсум, 2011. С. 446–449.
- Данилова Е.В.* Реформирование российской электроэнергетики (предпосылки и суть реформы) // Вестн. Томск. гос. ун-та. Томск: Национальный исслед. Томск. гос. ун-т, 2009. С. 274–277.
- Иванов А.В., Складчиков А.А., Хренников А.Ю.* Развитие электроэнергетики арктических регионов Российской Федерации с учетом использования возобновляемых источников энергии // Российская Арктика. 2021. № 13. С. 62–80.
- Корнюхова А.В.* Состояние, проблемы и перспективы развития электроэнергетики России // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Экономика. М.: РУДН, 2013. № 2. С. 49–60.
- Корчак Е.А.* Арктическая зона России: социальный портрет регионов. Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра РАН, 2017. 101 с.
- Мелентьев Л.А.* Очерки истории отечественной энергетики (развитие научно-технической мысли). М.: Наука, 1987. 277 с.
- Народное хозяйство СССР в 1989 г.: Стат. ежегодник. М.: Финансы и статистика, 1990. 766 с.
- Орлов С.Л.* Современное пространство России: новые подходы и концепции: монография. М.: Изд-во “Дашков и К”, 2022. 226 с.
- Подковальников С.В., Савельев В.А., Чудинова Л.Ю.* Перспективы электроэнергетической кооперации России и стран Северо-Восточной Азии // Проблемы прогнозирования. 2015. № 4. С. 118–130.
- Проблемные регионы ресурсного типа: азиатская часть России / под общ. ред. В.А. Ламина, В.Ю. Малова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 386 с. (Интеграционные проекты СО РАН; Вып. 4).
- Ридевский Г.В.* Пространственные структуры современной Беларуси: новая социально-экономическая география страны: Монография. Минск: БелНИИТ “Транстехника”, 2022. 244 с.
- Файбисевич Д.Л., Зейлигер А.Н.* Влияние мощности и размещения электростанций на формирование энергосистем // Электрические станции. 1990. № 4. С. 16–20.
- Фомина А.В.* Региональная экономика и территориальное распределение электроэнергетики Российской Федерации // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политех. ун-та. Экономические науки. 2008. № 5 (64). С. 129–133.
- Хрущев А.Т.* Избранные труды. Смоленск: Ойкумена, 2010. 320 с.
- Чайка Л.В.* Пространственные аспекты развития электроэнергетики Европейского Севера России // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2013. № 1 (25). С. 84–97.
- Энергетика XXI века: Условия развития, технологии, прогнозы / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2004. 386 с.

- Энергетика СССР в 1986–1990 гг. / под ред. А.А. Троицкого. М.: Энергоатомиздат, 1987. 312 с.
- Україна, промисловість та інвестиційна діяльність: Атлас. Київ: Інститут географії України, Державне науково-виробниче підприємство “Картографія”, 2003. 78 л.
- Central-European interconnection of electricity networks – proposal for an exercise. Meeting of experts on the problems of planning and operating large power systems. Geneva, Febr. 1990, UN ECE, EP/GE, 2/R.78/Add.2/Rev.
- Situation and prospects of international interconnections. Meeting of experts on the problems of planning and operating large power systems. Geneva, Jan. 1990, UN ECE, EP/GE, 2/R.79/Add.2.
- Central-European interconnection planning and operation practices. Meeting of experts on the problems of planning and operation large power systems. Geneva, May 1990, UN ECE, EP/GE, 2/R.78/Add.2/Rev.

## The Structure of the Unified Energy System of Russia in the Post-Soviet Period

Z. A. Ataev\*

Yesenin Ryazan State University, Ryazan, Russia

\*e-mail: ataev-rzn@ya.ru

The article examines the Unified Energy System of Russia from the point of view of its modern content and connectivity of structural parts. It is shown how the patterns of development of the USSR and Russia's energy space are historically connected. The main attention is paid to the geographical analysis of changes in the industrial space of Russia, which determines the bet on factual information. The study revealed that there are three structural parts in the Unified Energy System of Russia. According to the criterion of the absence of electrical connections for parallel operation with other systems, a zone of technologically isolated (decentralized) energy systems is allocated, this is by definition the area of network incoherence. According to the criterion of synchronous operation (with a common frequency of electric current), two more spatial zones are allocated. The first synchronous zone includes six integrated power systems. Geographical analysis shows that elements of weak communication are inherent in all power systems and are produced by the transformation of the post-Soviet space. A pronounced defect of network incoherence is Kaliningrad oblast. The energy system of the South is based on the transit of electricity through the territory of Ukraine. The disconnection will reduce the stability of the European segment of the Unified Energy System of Russia, the risks of losing operational access to Transnistria, Moldova and the south-western segment of the European energy system are high. Therefore, capital-intensive network projects bypassing Ukraine are relevant. The energy system of the Urals provides the Center–Siberia link with transit through Kazakhstan and, as a consequence, network incoherence and the risks of losing access to Central Asia. The second synchronous zone of the Unified Energy System of Russia includes one unified energy system of the East, which operates in parallel, but not synchronously with the first zone (weak network connection). The energy system of the East has a narrow spectrum of intersystem communication, but it is very promising for integration with the energy system of China.

*Keywords:* energy space, energy system, unified energy system, unified energy system, isolated energy system, interconnection of energy systems, operational zone, synchronous zone, stability of the energy system

### REFERENCES

- Alaev E.B. *Sotsial'no-ekonomicheskaya geografiya: Ponyatino-terminologicheskii slovar'* [Human Geography: Conceptual and Terminological Dictionary]. Moscow: Mysl' Publ., 1983. 350 p.
- Ataev Z.A. *Geograficheskie osnovy lokal'noi energetiki Tsentral'nogo ekonomicheskogo raiona Rossii: monografiya* [Geographical Bases of Local Energy of the Central Economic Region of Russia: Monograph]. Ryazan: Ryazan State University, 2008. 284 p.
- Ataev Z.A. Isolated energy system of Kaliningrad oblast. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2018, no. 1, pp. 101–110. (In Russ.).
- Berdin V.H., Kokorin A.O., Yulkin G.M., Yulkin M.A. *Vozobnovlyаемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Rossiiskoi Arktiki* [Renewable Energy Sources in Isolated Populated Areas of the Russian Arctic]. Moscow: World Wildlife Fund (WWF) Publ., 2017. 80 p.
- Bondarenko A.F., Buting G.D., Lyashenkov V.S., Markun et al. Problems of unification of energy systems of European countries. *Elektrichestvo*, 1991, no. 11, pp. 1–8. (In Russ.).
- Chaika L.V. Spatial aspects of electric power industry development in the Russian European North. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2013, no. 1 (25), pp. 84–97. (In Russ.).
- Central-European interconnection of electricity networks – proposal for an exercise. Meeting of experts on the problems of planning and operating large power systems. Geneva, Febr. 1990, UN ECE, EP/GE, 2/R.78/Add.2/Rev.*
- Central-European interconnection planning and operation practices. Meeting of experts on the problems of planning and operation large power systems. Geneva, May 1990, UN ECE, EP/GE, 2/R.78/Add.2/Rev.*

- Danilova E.V. Reforming the Russian electric power industry (prerequisites and essence of the reform). *Bull. Tomsk State Univ.*, 2009, pp. 274–277. (In Russ.).
- Energetika XXI veka: Usloviya razvitiya, tekhnologii, prognozy* [Energy of the XXI Century: Conditions of Development, Technologies, Forecasts]. Voropai N.I., Ed. Novosibirsk: Nauka Publ., 2004. 386 p.
- Energetics of the USSR in 1986–1990*. Troitsky A.A., Ed. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1987. 312 p.
- Faibisevich D.L., Zeiliger A.N. The influence of the capacity and location of power plants on the formation of power systems. *Elektricheskie Stantsii*, 1990, no. 4, pp. 16–20. (In Russ.).
- Fomina A.V. Regional economy and territorial distribution of the electric power industry of the Russian Federation. In *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki* [Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg Polytechnic University. Economic Studies]. St. Petersburg: Peter the Great SPbPU., 2008, no. 5 (64), pp. 129–133. (In Russ.).
- Gorlov V.N. New trends in the spatial organization of the Russian electric power industry. In *Sotsial'no-ekonomicheskaya geografiya: istoriya, teoriya, metody, praktika: sbornik nauchnykh statei* [Socioeconomic Geography: History, Theory, Methods, Practice: collection of scientific articles]. Smolensk: Universum Publ., 2011, pp. 446–449. (In Russ.).
- Ivanov A.V., Skladchikov A.A., Khrennikov A.Yu. Development of electric power industry in the Arctic regions of the Russian Federation considering the use of renewable energy sources. *Ross. Arktika*, 2021, no. 13, pp. 62–80. (In Russ.).
- Khrushchev A.T. *Izbrannye trudy* [Selected Works]. Smolensk: Oikumena Publ., 2010. 320 p.
- Korniyukhova A.V. The state, problems, and prospects of development of the Russian electric power industry. *Vestn. Ross. Univ. Druzhy Narodov. Ser.: Ekonomika*, 2013, no. 2, pp. 49–60. (In Russ.).
- Korchak E.A. *Arkticheskaya zona Rossii: sotsial'nyi portret regionov* [The Russian Arctic Zone: Social Portrait of the Regions]. Apatity: Publishing House of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2017. 101 p.
- Melentyev L.A. *Ocherki istorii otechestvennoi energetiki (razvitie nauchno-tekhnicheskoi mysli)* [Essays on the History of Domestic Energy (Development of Scientific and Technical Thought)]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 277 p.
- Orlov S.L. *Sovremennoe prostranstvo Rossii: novye podkhody i kontseptsii: monografiya* [Modern Space of Russia: New Approaches and Concepts: Monograph]. Moscow: Daskov and K Publ., 2022. 226 p.
- Podkovalnikov S.V., Savelyev V.A., Chudinova L.Yu. Prospects of electric power cooperation between Russia and the countries of Northeast Asia. *Problemy Prognozirovaniya*, 2015, no. 4, pp. 118–130. (In Russ.).
- Problemnye regiony resursnogo tipa: aziatskaya chast' Rossii* [Problematic Resource-type Regions: The Asian Part of Russia]. Lamin V.A., Malova V.Yu., Eds. Novosibirsk: SB RAS Publ., 2005. 386 p.
- Ridevsky G.V. *Prostranstvennye struktury sovremennoi Belarusi: novaya sotsial'no-ekonomicheskaya geografiya strany. Monografiya* [Spatial Structures of Modern Belarus: A New Socioeconomic Geography of the Country. Monograph]. Minsk: BelNIIT Transtechnika Publ., 2022. 244 p.
- Situation and prospects of international interconnections*. Meeting of experts on the problems of planning and operating large power systems, Geneva, Jan. 1990, UN ECE, EP/GE, 2/R.79/Add.2.
- The national economy of the USSR in 1989: Statistical yearbook*. Moscow: Finance and Statistics Publ., 1990. 766 p.
- Ukraina, promislovist' ta investitsiina diyal'ist': Atlas* [Ukraine, Industry and Investment Activity: Atlas]. Kiev: Institute of geography of Ukraine, State Scientific and verdict enterprise cartography Publ., 2003. 78 p.

УДК 911.6

## ОЦЕНКА УСЛОВИЙ И ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ АВИАХАБОВ В ЕКАТЕРИНБУРГЕ, ТЮМЕНИ, НОВОСИБИРСКЕ И КРАСНОЯРСКЕ

© 2023 г. О. В. Сорокин<sup>а</sup>, \*, А. С. Волошок<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: sorokin.oleg.98@mail.ru

Поступила в редакцию 02.07.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

В статье предложена методика оценки условий и факторов, способствующих формированию региональных авиахабов. Условие — это свойство среды, фактор — свойство самого формируемого авиахаба. В качестве условий рассмотрены: транспортно-географическое положение и объем локального спроса, в качестве факторов — пропускная способность аэропорта, представленность базового авиаперевозчика, инфраструктура для трансфера и качество расписания отправок и прибытий. Для анализа были отобраны четыре аэропорта: Кольцово (Екатеринбург), Рошино (Тюмень), Толмачево (Новосибирск) и Емельяново (Красноярск), в наибольшей степени подходящие для формирования в них регионального авиахаба. Эти аэропорты обслуживают крупнейшие города и находятся на окраине своих территориальных группировок городов, обращенных к другим территориальным группировкам городов, между которыми будет осуществляться трансфер, что является оптимальным сочетанием для формирования регионального хаба. Под региональным хабом понимается аэропорт в нестоличном городе, специализирующийся на обслуживании трансферных перевозок между разными частями страны. Для каждого условия и фактора приведено фактическое или расчетное значение показателя, оно пронормировано от 0 до 1. Из-за постоянства условий на коротком промежутке времени для увеличения потенциала формирования авиахаба администрации аэропорта необходимо работать с факторами, среди которых наиболее важным, гибким с точки зрения скорости и стоимости реализации является фактор авиационного расписания отправок и прибытий. По результатам анализа оптимальными условиями для формирования хаба обладает аэропорт Екатеринбурга, а администрация Новосибирского аэропорта лучше оперирует факторами, например, работает над удобством трансферных стыковок, взаимодействуя с базовым авиаперевозчиком.

**Ключевые слова:** воздушный транспорт, авиахаб, условия и факторы, пассажирские авиаперевозки, трансферные пассажиры

DOI: 10.31857/S258755662303010X, EDN: QTMRSW

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для России воздушный транспорт наиболее перспективный для обеспечения внутренних пассажирских связей из-за больших размеров территории и значительных расстояний между региональными центрами страны. Один из наиболее актуальных вопросов, на который может ответить география транспорта, — какова оптимальная территориальная организация каждого из его видов. В географии воздушного транспорта территориальная организация изучается с помощью дуалистической модели *point-to-point* и *hub and spoke*<sup>1</sup> (рис. 1).

После отмены регулирования воздушных перевозок и установления рыночных законов функционирования авиаотрасли для авиакомпаний экономически более выгодной стала модель перевозок *hub and spoke*, но на направлениях с объемом ежедневного спроса, кратно превышающим типовую вместимость среднемагистрального воздушного судна, предпочтительнее модель *point-to-point*. Эту нишу успешно заняли низкобюджетные авиаперевозчики (лоукостеры) — авиакомпании с ярко выраженной моделью сниженной себестоимости перевозок.

<sup>1</sup> *Point-to-point* представляет собой модель, при которой авиакомпания осуществляет перелеты между парами городов, имеющими достаточный потенциал пассажиропотока для заполнения нескольких рейсов в течение дня. При реализации модели *hub and spoke* авиакомпания выбирает один или несколько хабовых аэропортов, из которых осуществляются авиаперевозки в аэропорты с меньшим объемом пассажиропотока. В хабовом аэропорте осуществляются пересадки для перемещения внутри всей системы.

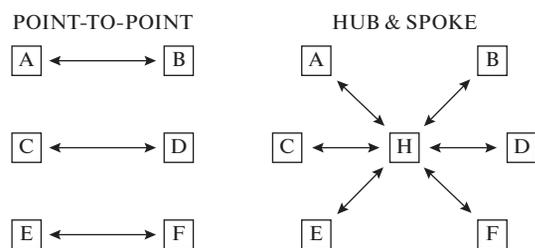


Рис. 1. Авиаперевозки по моделям *point-to-point* и *hub and spoke*.

Источник: (Cook and Goodwin, 2008).

Модель *hub and spoke* применяется классическими перевозчиками, обслуживающими широкую сеть направлений полетов с удобными стыковками между рейсами. Такая модель обеспечивает пассажирам больше потенциальных направлений и более высокую частоту рейсов, что улучшает транспортное обслуживание как населения, так и отдельных городов и территорий.

Территориальная структура авиаперевозок в России в целом детерминирована исторически сложившимися системами расселения и направлениями потоков пассажиров. Ее оптимизация в целом направлена на минимизацию экономических издержек авиакомпании, а также на сокращение затрат времени пассажира и уровня тарифа. Издержки перевозочной деятельности несут авиакомпании, поэтому территориальная структура авиаперевозок страны зависит от политики авиакомпаний в каждом конкретном аэропорте и на каждой авиалинии.

Для России характерны гиперцентрализация пассажирских авиаперевозок (Московский авиаузел обслуживает почти каждого второго авиапассажира России, в то время как в агломерации Москвы живет не более 20% населения страны) и эксцентриситет авиаперевозок (соответствует системе расселения), сильная вытянутость территории и диспропорции расселения и экономической активности между ее западной и восточной частями<sup>2</sup> (Антонов, Махрова, 2019; Тархов, 2018). Высокий уровень несоответствия системы расселения и системы авиаперевозок можно снизить с помощью формирования региональных авиахабов, специализирующихся преимущественно на субширотном перераспределении пассажиропотоков, благодаря которым среднее преодоленное пассажиром расстояние на воздушном транспорте будет в меньшей степени отличаться от орто-

<sup>2</sup> Значения показателей численности проживающего в городах населения и численности обслуженных пассажировкратно отличаются друг от друга.

дромического расстояния отправления пассажира. Ввиду отсутствия в открытом доступе статистики о фактических пассажиропотоках по отправлениям для территории России критерием оптимальности может служить текущее состояние территориальной структуры авиаперевозок. Она, с одной стороны, отражает маршрутную сеть авиакомпаний, а пассажиропотоки отражают потребительский спрос на предлагаемую авиакомпаниями сеть авиалиний. Но, с другой стороны, потребители не могут в явном виде предложить авиакомпаниям необходимые им маршруты, в связи с чем вынуждены перемещаться внутри предлагаемой сети неоптимальными маршрутами и/или использовать иные виды транспорта для совершения поездок. В отличие от большинства стран Северной Америки и Западной Европы, где либерализация авиаперевозок прошла на несколько десятков лет раньше, в России этот процесс начался в 1991 г. По состоянию на 2022 г. внутренние и международные рейсы выполняются только после выдачи разрешения на полеты Федеральным агентством воздушного транспорта.

Организация региональных хабов позволяет снизить издержки авиакомпаний и расходы авиапассажиров. Это происходит за счет более выгодных условий обслуживания, предоставляемых аэропортом базовому авиаперевозчику, например, выделения удобных выходов на посадку (гейтов) или строительства отдельного пассажирского терминала, предоставления оптимальных слотов на взлетно-посадочные операции и более выгодных финансовых условий аэропортового обслуживания при обеспечении роста пассажиропотока в аэропорте<sup>3</sup>.

Среди зарубежных источников по этой теме есть только узконаправленные статьи, посвященные одному или нескольким аспектам хабовых авиаперевозок, например, потенциал “хабовости” аэропортов (Chang et al., 2020; Dai et al., 2018; Huston and Butler, 1993; Wang et al., 2011; Zeigler et al., 2017), подключения к хабу новых направлений (Veldhuis, 1997), расчету оптимального времени для совершения пересадки (Logothetis and Miyoshi, 2018; Seredyński et al., 2014). В результате проведенного обзора литературы не обнаружено комплексных работ, предметом которых было бы формирование авиахабов. Тем не менее зарубежный опыт богат на исследования эффективности расписания в авиахабах, например Дубая и Стамбула (Logothetis and Miyoshi, 2018), или отдельных авиаперевозчиков, например Эмирейтс, Этихад Эйрвейз и Катар Эйрвейз (O’Con-

<sup>3</sup> Трансферная программа аэропорта Толмачево. <https://tolmachevo.ru/partners/airlines/development/>.

nell and Bueno, 2018), особенно по показателям качества и эффективности стыковок.

В отечественной литературе мало работ, посвященных формированию и анализу хабов (Гинзбург, 2009; Ляшенко, 2015; Неретин, 2017). Еще меньше работ затрагивает вопрос оценки условий и факторов, необходимых для формирования авиахабов. Часто условия и факторы указываются номинально и без численных оценок. Например, Гильц и Новосельский (2021) указали, что к числу общепринятых условий для создания авиахаба относятся: 1) присутствие базовой авиакомпании с устойчивым финансовым положением; 2) развитая инфраструктура аэропорта, позволяющая принимать большое число самолетов; 3) выгодное транспортно-географическое положение (ТГП); 4) большой пассажиропоток аэропорта; 5) невысокая цена на топливо; 6) развитое транспортное сообщение с аэропортом. В (Ярошевич, Вязовская, 2011) на роль третьего регионального хаба страны после Московского авиационного узла (включающего аэропорты Шереметьево, Домодедово и Внуково) и Пулково авторы рассматривают аэропорты Толмачево, Кольцово и Храброво, но оставляют выбор незавершенным, апеллируя к необходимости проведения дополнительного исследования по вопросу выбора маркирующего показателя – по пассажиропотоку, ТГП или уровню развития инфраструктуры.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования потребовалась обширная база данных, основанная на различных транспортных параметрах (расписания отправок и прибытий самолетов, численность обслуженных в аэропортах пассажиров, провозные емкости авиакомпаний в аэропортах, численность населения в городских агломерациях<sup>4</sup>, технико-эксплуатационные показатели пропускной способности аэропортовой инфраструктуры и др.).

Источником данных стали открытые материалы, предоставленные Росавиацией<sup>5</sup>, пресс-службами аэропортов, а также информация, собранная в полевых условиях и взятая из материалов, размещенных в сети Интернет. Для качественного отображения обработанных данных были использованы ГИС и возможности таких компьютерных приложений, как язык программирования Python (для автоматизации сбора и обработки данных сайта с информацией о перемещениях самолетов<sup>6</sup> и об объемах провозных емкостей) и система биз-

нес-аналитики Tableau (для визуализации пассажирских авиаперевозок России).

Хаб – аэропорт, специализирующийся на обслуживании пересадочных (трансферных) пассажиров, имеющий разветвленную сеть направлений, как правило, обслуживающий большое число пассажиров и значительное число взлетно-посадочных операций. Хаб можно определить через необходимые и достаточные условия. Необходимым является наличие обслуженных пассажиров, а достаточным – наличие трансферных (пересадочных) пассажиров. При этом очевидно, что для привлечения в аэропорт трансферных пассажиров должна возникнуть необходимость полета с пересадкой и существовать возможность такой пересадки в рассматриваемом хабе (рис. 2).

Региональный (авиа-)хаб – это хаб, ориентированный в первую очередь на обслуживание трансферных перевозок внутри страны между населенными пунктами, расположенными вне региона, в котором расположен рассматриваемый хаб.

Необходимость перелета с пересадкой в авиахабе возникает из-за отсутствия прямых рейсов между конкретной парой аэропортов, или их низкой частоты, и/или высокой стоимости прямых рейсов в сравнении с пересадочным рейсом, и/или иных причин.

Возможность перелета с пересадкой появляется при подключении обоих целевых аэропортов (отправления и прибытия) к хабу и при наличии у аэропорта-хаба временного (расписание отправок и прибытий) и инфраструктурного (сквозная регистрация на рейс, система обработки багажа трансферных пассажиров, транзитный коридор, по которому трансферные пассажиры из зоны прилета сразу попадают в стерильную зону для ожидания стыковочного рейса, минуя повторные регистрацию на рейс и получение/сдачу багажа) удобства для совершения трансфера.

Для реализации трансферного обслуживания пассажиров у аэропорта – потенциального хаба должны быть выполнены условия, а для эффективного функционирования у такого аэропорта должны быть максимально использованы его свойства, т.е. его факторы.

В соответствии с определениями Горкина и Смирнягина (1973) *условие* размещения какого-либо объекта (авторы рассматривали условия размещения производства) – это свойство элементов среды, а *фактор* размещения – свойство самого размещаемого объекта, которое определяет необходимость близости к определенным элементам среды. Приложим этот подход к задаче формирования авиахабов в географии авиатранспорта.

Основными внешними условиями формирования региональных авиахабов являются доста-

<sup>4</sup> Для этого взят показатель численности населения в городских округах, обслуживаемых аэропортами, в связи с большей вовлеченностью городских жителей в межрегиональные авиатранспортные связи.

<sup>5</sup> <https://favt.gov.ru/>.

<sup>6</sup> <https://www.flightradar24.com/>.

Привлечение трансферных пассажиров в хаб происходит при возникновении необходимости и наличии возможности совершить трансфер в аэропорте

Участник трансфера	Необходимость (для участников)	Возможность (для пассажира)	Реализация возможности (для участников)
Трансферный пассажир	<ul style="list-style-type: none"> <li>Нет прямого рейса между (целевыми) аэропортами корреспонденции пассажира (малый размер хинтерланда)</li> <li>Есть прямой рейс, но низкая частота/высокая стоимость прямого рейса/иные причины</li> </ul>	Оба целевых для пассажира аэропорта (аэропорт вылета и аэропорт прилета) подключены к хабу	Цена трансфера Время трансфера Инфраструктурное удобство трансфера
Аэропорт (хаб)	Рост операционной выручки и прибыли за счет увеличения числа обслуженных пассажиров при максимальной обслуженности локального рынка	В хабе есть инфраструктура для трансфера: 1) сквозная регистрация на рейс 2) наличие транзитного коридора 3) багаж трансферных пассажиров обрабатывается без их участия	Выполнены условия: 1) опт. ТПП хаба, 2) достаточный локальный спрос Максимизированы факторы: 1) проп. способность хаба, 2) трансферн. инфр-ра, 3) баз. АК, 4) опт. расписание, 5) др.
Авиакомпания	Рост операционной выручки и прибыли за счет улучшения клиентского предложения: сеть авианаправлений с удобными стыковками	Расписание прилетов и вылетов удобно для пересадки трансферного пассажира	Решена оптимизационная задача – составленное расписание воздушного судна максимизирует операционную прибыль: 1) загрузка кресел максимальна (~85% и выше) 2) простой самолета и персонала минимизируется
Пояснения	Необходимость вызвана неоптимальностью транспортной услуги для всех участников трансфера	Возможность трансфера возникает при появлении условий для его реализации	Возможность реализуется при наличии положительного эффекта для всех участников трансфера

Рис. 2. Описание процесса привлечения трансферных пассажиров в авиахаб. Составлено автором.

точная величина территории страны<sup>7</sup> и особенно-сти расселения<sup>8</sup> внутри нее. Эти условия отчасти определяют и само местоположение потенциальных авиахабов. Для субширотно вытянутой и неравномерно заселенной России такой авиахаб можно разместить, используя три подхода:

- 1) в городе, расположенном на окраине одной из населенных зон<sup>9</sup>, обращенной к другой населенной зоне;
- 2) в наиболее населенном городе одной из зон;

<sup>7</sup> Для простоты расчета примем, что страна имеет форму круга. Конкуренцию в перевозках между центральным и четырьмя (равномерно отдаленными по азимуту) периферийными городами воздушный транспорт выигрывает, начиная с дистанций 750 км и более (Сорокин, Самбуков, 2021). При таком расстоянии перелеты с пересадкой точно будут более востребованными в сравнении с железнодорожными поездками даже в случае наличия железнодорожного сообщения между всеми соседствующими периферийными городами. Достаточная площадь страны для формирования регионального авиахаба =  $\pi r^2 = 3.14 \times 750 \times 750 = 1.766$  млн км<sup>2</sup>.

<sup>8</sup> Потребность в региональном авиахабе формируется при возникновении диспропорции в расселении, что проявляется в экономической нецелесообразности обеспечения городов малой плотности большим набором авиааэропортов.

<sup>9</sup> В рамках этого исследования населенная зона нами определяется как визуальная топографическая концентрация/скопление городов. Для масштаба всей страны можно рассмотреть, как минимум, две населенные зоны, географически разделяемые на условно западную и условно восточную с Уральскими горами в виде рубежа между ними (см. рис. 3).

3) в городе, расположенном между населенными зонами.

В качестве населенных зон будем рассматривать условно западную и условно восточную зоны, разделяемые Уральскими горами. Наиболее заселенные очаги обозначены красным контуром (рис. 3)<sup>10</sup>.

Для формирования региональных хабов в России предлагается использовать в качестве основных два условия (внутренних) и четыре фактора<sup>11</sup>.

Перечень внутренних условий формирования авиахабов включает: выгодность ТПП аэропорта и величину локального спроса на пассажирские авиаперевозки. Такие внутренние условия обусловлены необходимостью, с одной стороны, оптимального ТПП для минимизации издержек на обслуживание взлетно-посадочных операций. С другой стороны, именно условием, а не фактором, как может показаться, выступает необходи-

<sup>10</sup> В рамках исследования учитывается только городское население.

<sup>11</sup> Перечень условий и факторов не является исчерпывающим. Например, важным фактором служат метеорологические условия, которые, например в Иркутске, являются причиной регулярных задержек и отмен авиарейсов. Несмотря на масштаб и всеобщую государственную важность, фактор государственной транспортной политики играет менее существенную роль, поскольку федеральные органы исполнительной власти несут ответственность за состояние ранее построенной аэродромной инфраструктуры, но не за целенаправленное развитие проекта авиахаба в конкретном аэропорте. Более важную роль для хабов играют региональные органы исполнительной власти.

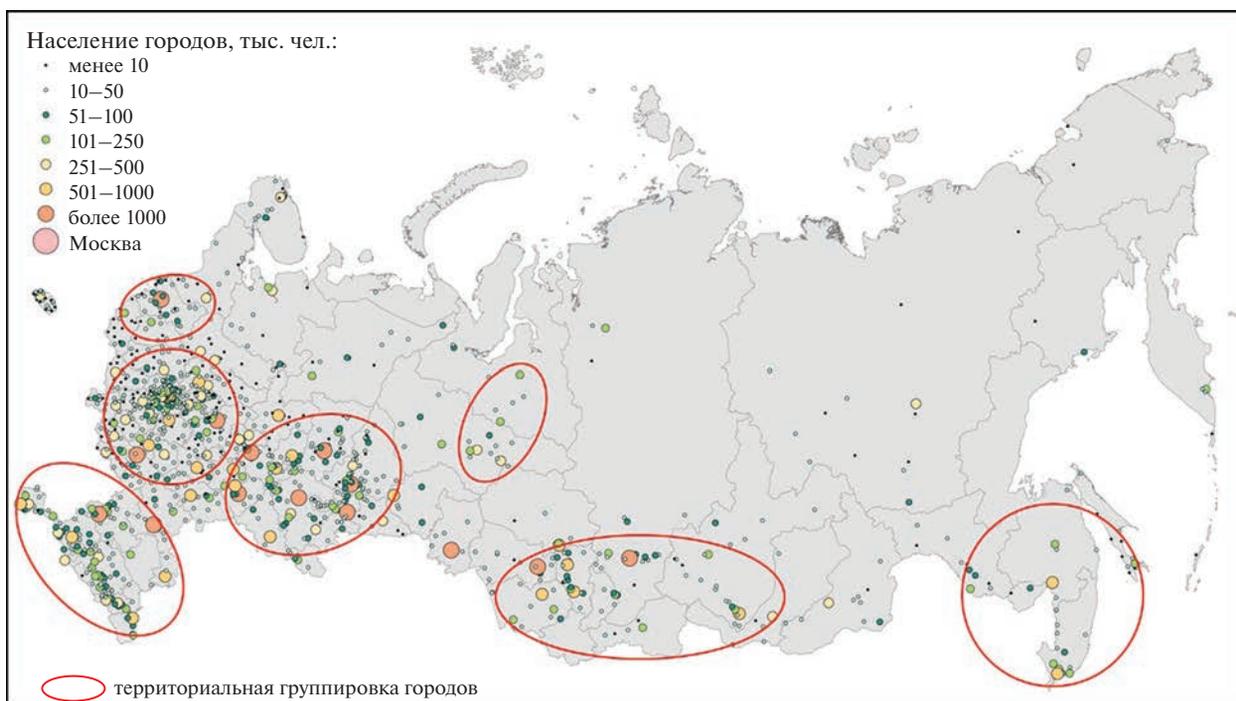
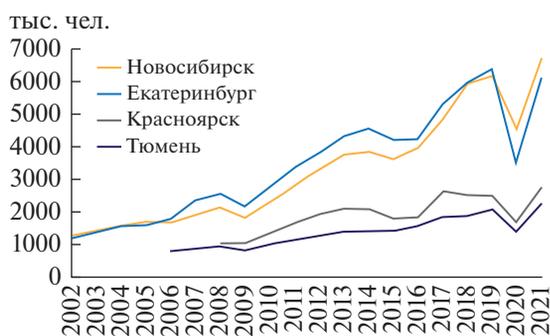
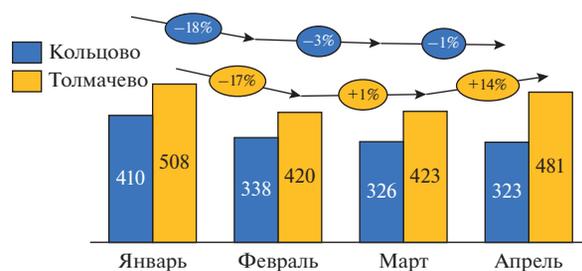


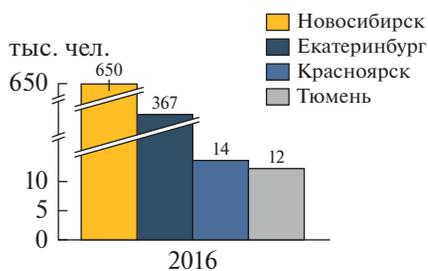
Рис. 3. Людность городов России (на 1 января 2020 г.) и их территориальные группировки. Составлено автором.



Пассажирооборот



Пассажирооборот Толмачево и Кольцовов, 2022, тыс. чел.



Обслуженные трансферные пассажиры, 2016 г.



Трансферные пассажиры в Толмачево

Рис. 4. Обслуженные пассажиры, в том числе трансферные, в аэропортах Новосибирска, Екатеринбурга, Красноярска и Тюмени.

мый минимальный спрос на авиаперевозки для раскатки рейсов. Выгодное ТГП обеспечит возможность формирования авиахаба (необходимое условие), а локальный спрос (достаточное условие) станет необходимым катализатором для создания авиахаба. ТГП оценено как среднее от суммы четырех метрик: сумм расстояний от потенциальных региональных хабов до аэропортов федерального значения и центров субъектов Федерации, с нормированием<sup>12</sup> на население и без нормирования.

Для выявления четырех основных, но не единственных<sup>13</sup> факторов использовались объективные предпосылки. Аргументация факторов дана в порядке увеличения масштаба рассмотрения: *регион, аэропорт, авиакомпания, деятельность авиакомпании*.

- Хаб — это аэропорт с высокими пиковыми нагрузками на инфраструктуру, которые вызваны концентрацией большого числа пассажиров и, соответственно, воздушных судов как на взлетно-посадочной полосе, так и на перроне, где они отстаиваются между выполняемыми рейсами. **Значит, хаб должен обладать достаточными значениями показателей пропускной способности инфраструктуры аэродрома и пассажирского терминала.**

- Хаб — это особый вид авиаузла, специализирующийся на перераспределении пассажиров, т.е. в нем высока доля и численность пассажиров, которые попадают внутрь аэропорта не через главный вход, а через зону прилета. Для оптимального обслуживания трансферных пассажиров важно обеспечить в аэропорте соответствующую трансферную инфраструктуру с целью уменьшения нагрузки на инфраструктуру для локального рынка: *сквозная регистрация на рейс* позволяет не тратить время в очереди для повторной регистрации на стыковочный рейс; *обработка багажа трансферных пассажиров* без их участия позволяет не ожидать получение багажа; *транзитный коридор* исключает необходимость повторного досмотра пассажиров и их ручной клади. **Трансферная инфраструктура хаба необходима для уменьшения или исключения затрат времени на формальные предполетные процедуры, что удешевляет стоимость услуги трансфера и позволяет максимально увеличить численность обслуженных трансферных пассажиров.**

<sup>12</sup>Расстояние до центров субъектов Федерации умножено на значение от 0 до 1, полученное в результате деления фактической численности населения города в 2021 г. на максимальную численность населения (в исследовании это Москва). У Москвы нормированное значение не изменится, так как показатель будет равен 1.

<sup>13</sup>Например, привлекательность самих хабов для посещения или привлекательность локаций, возле которых они располагаются, климатический фактор, фактор геополитических рисков.

- Аэропорту с достаточной пропускной способностью аэродромной инфраструктуры и наличием трансферной инфраструктуры необходим базовый авиаперевозчик, присутствие которого будет способствовать привлечению трансферных пассажиров: наличие одного крупного авиаперевозчика или нескольких авиаперевозчиков одного авиаальянса или имеющих договоренность по совместному обслуживанию пассажиров увеличивает надежность и обеспечивает удобство стыковочных рейсов для пассажира, особенно в случае задержек, отмен рейсов, применения бонусных программ (накопление миль и др.). С точки зрения взаимодействия авиакомпании и аэропорта последний может обеспечить более выгодные условия базовому авиаперевозчику, например, выделить более удобные выходы на посадку (гейты) или построить отдельный пассажирский терминал, предоставить оптимальные слоты на взлетно-посадочные операции и более выгодные финансовые условия аэропортового обслуживания при обеспечении роста пассажиропотока в аэропорте. **Более выгодные условия для базового авиаперевозчика уменьшают стоимость услуг этого авиаперевозчика для пассажиров**, что увеличивает его конкурентоспособность перед другими авиакомпаниями и привлекает трансферных пассажиров для осуществления пересадки в хабе рассматриваемого авиаперевозчика, а не в хабах-конкурентах.

- Для трансферного пассажира важнейшим фактором (кроме стоимости и инфраструктурного удобства) для принятия решения в пользу конкретного хаба (при наличии конкуренции между хабами) служит стыковочное и общее время, затрачиваемые на авиаперелет. Стоит учесть, что помимо большой длительности полета, достигающей трети суток (8–9 часов), субширотные полеты в России связаны с изменением часового пояса.

На основе анализа внутренних и внешних условий, а также предварительной оценки факторов, в первую очередь пропускной способности, были выбраны четыре аэропорта, имеющие наибольший потенциал для формирования регионального хаба: Кольцово (Екатеринбург), Рошино (Тюмень), Толмачево (Новосибирск) и Емельяново (Красноярск)<sup>14</sup>.

<sup>14</sup>Аэропорты были выбраны по сочетанию сразу нескольких отборочных критериев: аэропорты при наиболее крупных городских агломерациях, расположенных на окраинах Волго-Уральской и Сибирской территориальных группировок городов (см. рис. 3). Территориальные группировки городов выделены по принципу территориальной концентрации (агломерирования) городов с учетом исторических, физико-географических и социально-экономических связей внутри таких группировок. Приведенные границы показывают только объем группировок и их делимитацию по территории.

**Таблица 1.** Оценка условий и факторов формирования региональных авиахабов

Условия и факторы	Наименование	Показатель	Кольцово	Рошино	Толмачево	Емельяново
Условие 1	ТГП	Центральность аэропорта относительно региональных центров (РЦ) и аэропортов федерального значения (ФЗ) с нормированием на население и без, тыс. км (оценивается как сумма расстояний), среднее по четырем метрикам, тыс. км <sup>1</sup>	144.6	153.3	197.4	226.4
Условие 2	Локальный спрос (оценка)	Объем спроса (свободные деньги × число плательщиков НДС) в городском округе <sup>2</sup> , млрд руб.	21.4	9.5	13.5	3.3
Фактор 1	Пропускная способность	Число возможных взлетно-посадочных операций на взлетно-посадочной полосе в час, ед.	28	16	40	24
Фактор 2	Инфраструктура для трансфера	Год появления трансферной инфраструктуры, среднее значение года, в который появилась вся инфраструктура <sup>3</sup>	2014	2018	2011	2010
Фактор 3	Базовый авиаперевозчик	Произведение доли аэропорта в провозных емкостях авиакомпании и доли авиакомпании в провозных емкостях аэропорта, у. е.	380	155	1015	150
Фактор 4	Качество расписания	Сумма качеств всех стыковок за день, июль 2019 г., у. е. <sup>4</sup>	*	*	273.7	*

\* Характеристика не рассчитана из-за отсутствия релевантных данных для исследования.

Источник. Составлено автором.

<sup>1</sup> См. пояснение в тексте.

<sup>2</sup> Городской округ концентрирует максимальную долю городских жителей, которые в большей степени вовлечены в межрегиональные авиатранспортные перевозки, чем сельские жители.

<sup>3</sup> См. пояснение в тексте.

<sup>4</sup> Использована методика из (Park et al., 2010), где качество рейса измеряется как произведение трех индексов: фактическое время пересадки относительно интервала (два варианта для трех категорий 45–180 мин или 60–840 мин), индекс превышения расстояния непрямого рейса от максимального (1.6), индекс частоты прямых рейсов (если число рейсов 8 в сутки и более, то необходимость в пересадочных рейсах пропадает), всего интервала (размерностью от 0 до 1). Сумма этих индексов для всех рейсов хаба – характеристика качества работы хаба.

Оценка потенциала аэропортов по формированию в них регионального авиахаба произведена двумя способами: 1) ранжированием аэропортов по сумме и среднему значению фактических или расчетных показателей условий и факторов; 2) суммированием нормированных значений показателей всех условий и факторов от 0 до 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С помощью изложенной выше методики абсолютные показатели условий и факторов (табл. 1) были оценены двумя способами.

**Условие 1.** Показатель центральности аэропорта рассчитан как среднее значение четырех характеристик: 1) сумма расстояний от аэропорта до всех аэропортов России федерального значения; 2) и 3) сумма расстояний от аэропорта до административных центров субъектов Федерации с нормированием и без нормирования на численность

обслуживаемого федеральными аэропортами населения; 4) численность населения, проживающего в административных центрах субъектов Федерации (см. выше).

**Условие 2.** Локальный спрос оценим в виде “свободных денег”, имеющихся на руках у жителей главного обслуживаемого муниципального образования<sup>15</sup> (городского округа). Свободные деньги – это объем потенциальных денежных средств, который может быть использован, в том числе, на авиаперелеты. Рассчитывается как про-

<sup>15</sup> Сделано допущение, что для этого условия принимается в расчет население только непосредственно обслуживаемого города. Это необходимо, потому что именно за счет местного населения “раскатываются” рейсы, частота и число которых увеличивают конкурентоспособность аэропорта для формирования в нем регионального авиахаба. Расчет объема свободных денег – отдельная научная задача, так как помимо калькуляции требует определения границ самой городской агломерации, которые не совпадают с административными границами города.

изведение числа налогоплательщиков в городском округе на разность среднемесячного дохода и стоимости фиксированного набора потребительских товаров и услуг в регионе.

**Фактор 1.** Наиболее дорогим и наиболее важным для пропускной способности аэропорта элементом аэропортовой инфраструктуры является взлетно-посадочная полоса. От ее параметров, а также конфигурации рулежных дорожек и количества перронов зависит число взлетов и посадок, что критично для пиковых нагрузок при формировании стыковочных волн хаба. Также эта характеристика имеет объективный измеримый показатель в виде числа взлетно-посадочных операций (ВПО) в час. Поэтому для сравнения будет использован именно этот показатель.

**Фактор 2.** Для удобного осуществления трансфера необходимы все виды трансферной инфраструктуры. Однако отсутствие какого-то одного вида не обнулит работу по обслуживанию трансферных пассажиров, а лишь уменьшит комфорт пересаживающихся в хаб. Для оценки потенциала рассчитаем средний год появления трансферной инфраструктуры<sup>16</sup> в каждом из аэропортов. Такой подход будет более оптимальным, поскольку на рынке трансферных авиаперевозок более раннее предложение аэропортом услуги по трансферу обеспечит более высокую вероятность привыкания пассажира к трансферу в конкретном аэропорте, а также поможет администрации аэропорта быстрее повысить качество оказания этой услуги и при необходимости внести изменения в самой хабовой инфраструктуре.

**Фактор 3.** С точки зрения базового авиаперевозчика хаб может быть оценен в отношении приоритетности. Для этого достаточно перемножить доли присутствия авиакомпании в аэропорте и аэропорта в структуре авиакомпании. Это можно оценить по числу ВПО, объему провозных емкостей или численности обслуженных пассажиров. Наиболее точная информация — это численность обслуженных аэропортом пассажиров, но такая статистика в аэропортах в разрезе авиакомпаний отсутствует в публичном доступе. Поэтому для анализа произведена оценка провозных емкостей авиакомпании с последующим агрегированием на уровне аэропорта для выбранных целевых аэропор-

тов. Для этой цели был написан программный код, на вход которому подавался список регистрационных номеров бортов воздушных судов каждой авиакомпании, а на выходе — объемы провозных емкостей по отправлениям в разрезе авиакомпаний, которые затем суммировались по авиакомпаниям и аэропортам, после чего подсчитывались доли присутствия базового авиаперевозчика в каждом из аэропортов. Нам важно учитывать оба долевых показателя, поэтому мы перемножили их и получили интегральный показатель значимости в системе авиаперевозчик—хаб.

**Фактор 4.** Для сравнения аэропортов по этому фактору необходимы данные о расписании отправок и прибытий по всем аэропортам. Однако данные были получены только для Толмачево. Для анализа стоит сравнить именно суммарную оценку качества хаба (за идентичный равный период — сутки, неделя и т.п.), которая складывается из сумм качеств всех стыковок в течение заданного периода. Необходимость оценки каждой потенциальной стыковочной пары рейсов обусловлена высокой значимостью фактора времени, ограниченностью ресурсов авиакомпании и аэропорта, что не позволяет произвести одну идеальную стыковочную волну в течение дня. Для подсчета качества была применена методика (Park et al., 2010)<sup>17</sup> в связи с наилучшей корреляцией рассчитанных ее авторами оценочных значений с численностью и долей обслуженных трансферных пассажиров в крупнейших авиахабах мира.

<sup>17</sup> Качество каждого стыковочного рейса оценивается как сумма трех факторов  $\tau$ ,  $\delta$ ,  $\beta$ .  $\tau$  — фактор времени пересадки (сопоставляется превышение фактического времени пересадки с заданным интервалом, в котором есть минимальное время, необходимое для совершения пересадки, например, проход по гейту, пересортировка багажа, паспортный контроль перед проходом в стерильную зону, и максимальное время, превышение которого обнуляет значимость такой пересадки). В настоящем исследовании временной интервал составляет 90–270 мин в соответствии с минимальным временем в трансферных программах анализируемых аэропортов. Верхнее ограничение 270 мин — трехкратное минимальное время (Logothetis and Miyoshi, 2018).  $\delta$  — фактор маршрутизации (сопоставляется сумма расстояний между первым аэропортом вылета и хабом и между хабом и аэропортом назначения с ортодромическим расстоянием прямого авиаперелета между аэропортом вылета и аэропортом прилета). В настоящем исследовании максимальный показатель фактора маршрутизации, превышение которого обнуляет качество пересадки, составляет 1.7 (Park использовал 1.6) в связи с меньшей плотностью аэропортов на территории России.  $\beta$  — фактор количества прямых рейсов (сопоставляется число прямых рейсов на анализируемом стыковочном рейсе с максимальным на всей исследуемой совокупности). В настоящем исследовании этот фактор не принимался в расчет по причине низкой интенсивности авиарейсов в России и меньшего значения фактора времени при авиаперелетах, особенно затрагивающих слабо освоенные территории.

<sup>16</sup> При формировании рынка трансферных перевозок именно год появления, а не качество инфраструктуры становится более важным фактором последующего развития хаба в силу укоренения привычек пассажиров и более быстрой возможности менеджмента улучшить сервис трансфера при более скором выявлении проблем при использовании. Кроме этого, измерение качества трансферной инфраструктуры требует проведения отдельного масштабного социологического исследования, выборку которого должны составить регулярные трансферные пассажиры рассматриваемых аэропортов.

**Таблица 2.** Ранги по измеряемым показателям условий и факторов аэропортов России с наибольшим потенциалом для обслуживания субширотного трансфера

Условия и факторы	Кольцово	Рощино	Толмачево	Емельяново
Условия				
Удобство транспортно-географического положения	1	2	3	4
Локальный спрос (оценка)	1	3	2	4
Факторы				
Пропускная способность инфраструктуры	2	4	1	3
Инфраструктура для трансфера	3	4	2	1
Базовый авиаперевозчик	2	3	1	4
Качество расписания	—	—	1*	—
Средний ранг	1.8	3.2	1.8	3.2

\* Полетные расписания за 2011–2019 гг. предоставил только аэропорт Новосибирска.

Источник. Составлено автором.

**Таблица 3.** Нормированные показатели условий и факторов аэропортов России с наибольшим потенциалом для обслуживания субширотного трансфера

Условия и факторы	Кольцово	Рощино	Толмачево	Емельяново
Условия				
Удобство транспортно-географического положения	1.00	0.94	0.63	0.43
Локальный спрос	1.00	0.44	0.63	0.15
Факторы				
Пропускная способность инфраструктуры	0.70	0.40	1.00	0.60
Инфраструктура для трансфера	0.66	0.33	0.92	1
Базовый авиаперевозчик	0.37	0.15	1.00	0.15
Качество расписания	—	—	1.00*	—
Итого, сумма	3.73	2.26	4.18	2.33
Итого, среднее	0.714	0.386	0.827	0.466

\* Полетные расписания на 01.05.2022 предоставил только аэропорт Новосибирска.

Источник. Составлено автором.

Результаты расчета по первому способу слабо дифференцированы (табл. 2).

Аэропорты Кольцово и Толмачево поделили 1-е место, Рощино и Емельяново – 3-е место. У Кольцово выше значения условий, у Толмачево – значения факторов. Кольцово обслуживает агломерацию с большей численностью населения<sup>18</sup>. Также Кольцово обслуживает самый западный<sup>19</sup> в сравнении с остальными город, что уменьшает сумму всех расстояний до остальных аэропортов федерального значения и административных центров субъектов России.

<sup>18</sup>В радиусе 150 км от Екатеринбурга суммарно проживает 2.6 млн жителей, в Новосибирске – 1.8 млн жителей.

<sup>19</sup>Несмотря на расположение аэропорта Рощино на 200 км восточнее, он остается в “тени” аэропорта Кольцово, который также может обслуживать население Тюмени в виду большего числа авианаправлений и частоты авиарейсов.

Особенности методики нормирования:

1) для расчета по второму способу пронормируем значения показателей сравниваемых условий и факторов (см. табл. 1);

2) для условия 1 в качестве единицы будет задан минимальный (он же наилучший) результат;

3) для условия 2 и всех факторов в качестве единицы будет использован наибольший (он же наилучший) результат;

4) для фактора 2 в качестве нулевого будет принят 2022 г.;

5) фактор качества расписаний в оценке потенциала аэропортов учтен не будет, так как данные по этому фактору имеются только для Толмачево<sup>20</sup>;

<sup>20</sup>Для корректного сопоставления необходимы данные за конкретный день в допандемийный период.

б) при приведении оценки других аэропортов из единицы будет вычитаться частное от показателя конкретного аэропорта и лидирующего аэропорта.

После проведенного нормирования по второму способу результаты стали более дифференцированными (табл. 3).

Аэропорт Толмачево опередил Кольцово на 0.113 балла, а значение для Емельяново больше, чем для Рошино, на 0.08 балла. Отметим, что такое нормирование не является образцовым, потому что сопоставление результатов нормированной оценки потенциала и объема трансферного пассажиропотока или его доли в общей численности обслуженных пассажиров, хоть и дает корреляции на уровне 0.98, но четырех наблюдений недостаточно с точки зрения применения математического аппарата. Однако рассматривать большее число аэропортов не получится из-за отсутствия статистики численности обслуженных трансферных пассажиров за исследуемый период<sup>21</sup>.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанная авторская методика позволяет комплексно оценить потенциал формирования регионального авиахаба, специализирующегося на внутристрановом трансфере. Эта методика может быть использована для оценки потенциала хабов для стран с достаточной площадью для их формирования.

При доработке методики оценку хабов можно произвести и с точки зрения пересадок с внутренних рейсов на международные, и с точки зрения пересадок между разными международными рейсами. В странах с более равномерным расселением и большим числом городов и аэропортов с похожим ТПП (т.е. с большей вариативностью выбора аэропорта для осуществления трансфера) методика может быть изменена по условиям и существенно расширена по факторам, например, может также быть рассмотрена аттрактивность аэропортов трансфера или населенных пунктов в непосредственной близости от них или вероятность возникновения неблагоприятных погодных явлений для взлетов, посадок и др.

### ВЫВОДЫ

Несмотря на неоспоримое базовое преимущество в виде изначально более выгодных условий аэропорта Кольцово (Екатеринбург) для формирования в нем регионального авиахаба, управление факторами администрацией аэропорта Толмачево

(Новосибирск) ведется лучше, что определяет аэропорт Толмачево как более перспективный для формирования в нем регионального авиахаба. Это подтверждается как численностью и долей обслуженных трансферных пассажиров, так и общей динамикой численности пассажиров в сравнении с аэропортом Кольцово (см. рис. 4).

Успешный исход реализации проекта регионального хаба в аэропорте Толмачево стал возможным благодаря наложению ряда положительных предпосылок. Так, на базе этого аэропорта Толмачевский авиаотряд реорганизовался в авиакомпанию “Сибирь” (с 2006 г. — “S7 Airlines”), являющуюся базовым авиаперевозчиком аэропорта. Размер компании (около 100 воздушных судов) позволяет организовывать удобное стыковочное расписание для осуществления трансферных перевозок. Новосибирск с советского периода являлся крупным транспортно-логистическим узлом. Основанный в 1893 г. при строительстве моста Транссибирской магистрали через р. Обь, благодаря реализации своего экономико-географического положения Новосибирск уже через 70 лет (к 1962 г.) стал городом с миллионным населением, что обеспечило достаточный локальный спрос на авиаперевозки. И наконец, реализации проекта трансферного хаба способствовало обеспечение аэропорта соответствующей инфраструктурой, благодаря которой есть возможность качественного и быстрого обслуживания трансферных авиапассажиров.

В аэропорте Кольцово (Екатеринбург) базовый перевозчик — авиакомпания “Уральские авиалинии”, имеющая вдвое меньший размер парка воздушных судов и меньшую долю в еженедельных провозных емкостях, предоставляемых пассажирам аэропорта, что уменьшает ее значимость в качестве базового авиаперевозчика и существенно сокращает возможность для организации стыковочного расписания.

Аэропорт Емельяново (Красноярск), несмотря на достаточную численность населения города и значительный объем свободных денег у населения, доступных для трат на авиаперелеты, не располагает базовым авиаперевозчиком. Эту функцию рудиментарно выполняют несколько перебазированных туда самолетов авиакомпании “Аэрофлот”<sup>22</sup>, что соответствует стратегии развития компании<sup>23</sup>.

Аэропорт Рошино (Тюмень) имеет худшие среди четырех рассматриваемых аэропортов значения показателей. Это вызвано как распределенной сетью авиахабов у авиакомпании “Utair”, что обуславливает невысокую долю провозных

<sup>21</sup> Данные имеются только за 2013–2022 гг. для Толмачево, за 2015–2017 гг. для Кольцово, за 2015–2016 гг. для Рошино и 2016–2021 гг. для Емельяново.

<sup>22</sup> <https://www.kommersant.ru/doc/4836936>.

<sup>23</sup> [https://www.aeroflot.ru/media/afllfiles/media/strategy/pasport\\_2022.pdf](https://www.aeroflot.ru/media/afllfiles/media/strategy/pasport_2022.pdf).

емкостей базового перевозчика, так и близким расположением к более крупному аэропорту Екатеринбурга, который может обеспечить большую номенклатуру направлений и более высокую частоту авиарейсов.

Несмотря на небольшой перечень влияющих факторов, можно из него выделить более и менее значимые. Текущее исследование показало, что первостепенным фактором является наличие базового авиаперевозчика. Данный фактор в российских условиях также сильно связан с историческими предпосылками, но опирается на предшествующие объемы обслуживания перевозок. Это косвенно отражает, с одной стороны, численность населения в городе, а с другой, его транспортно-географическое положение, определяющее необходимость использования воздушного транспорта. Однако без эффективного менеджмента и системной работы по реализации проекта регионального хаба транспортный потенциал может быть ослаблен более быстрой организацией в конкурирующих аэропортах. Фактор трансферной инфраструктуры тоже важен, но он скорее является продолжением фактора менеджмента, стремящегося обеспечить реализацию хабового проекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонов Е.В., Махрова А.Г.* Крупнейшие городские агломерации и формы расселения наднагломерационного уровня в России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 4. С. 31–45.
- Гильц Н.Е., Новосельский Н.К.* Возможности развития Международного аэропорта Красноярск в авиационный хаб // Экономика и управление: научно-практический журн. 2021. № 3. С. 143–148.
- Гинзбург Е.С.* Совершенствование пространственной организации авиационного транспорта России: Дис. ... канд. геогр. наук. М., 2009. 158 с.
- Горкин А.П., Смирнягин Л.В.* О факторах и условиях размещения капиталистической промышленности // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1973. № 3. С. 68–72.
- Ляшенко Е.В.* Современные особенности внутренних авиасвязей в России // География в школе. 2015. № 4. С. 3–8.
- Неретин А.С.* Территориальная структура пассажирского авиационного транспорта в Европейской России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 6. С. 19–38.
- Сорокин О.В., Самбуров К.В.* Зоны тяготения пассажирских перевозок Москвы и Санкт-Петербурга // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2021. № 6. С. 135–147.
- Тархов С.А.* Изменения авиатранспортной связности городов России в 1990–2015 // Изв. РАН. Сер. геогр. 2018. № 2. С. 5–26.
- Ярошевич Н.Ю., Вязовская В.В.* Формирование узловых аэропортов в Российской Федерации: оценка перспектив // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 4 (35). С. 59–62.
- Cook G.N., Goodwin J.* Airline networks: A comparison of hub-and-spoke and point-to-point systems // J. Aviation/Aerospace Education & Res. 2008. Vol. 17. № 2. P. 1.
- Chang Y.C., Lee W.H., Hsu C.J.* Identifying competitive position for ten Asian aviation hubs // Transport Policy. 2020. Vol. 87. P. 51–66.
- Dai L., Derudder B., Liu X.* The evolving structure of the Southeast Asian air transport network through the lens of complex networks, 1979–2012 // J. Transport Geogr. 2018. Vol. 68. P. 67–77.
- Huston J.H., Butler R.V.* Airline hubs in the single European market: A benchmark analysis // Rev. Industrial Organization. 1993. Vol. 8. № 4. P. 407–417.
- Logothetis M., Miyoshi C.* Network performance and competitive impact of the single hub – A case study on Turkish Airlines and Emirates // J. Air Transport Management. 2018. Vol. 69. P. 215–223.
- O'Connell J.F., Bueno O.E.* A study into the hub performance Emirates, Etihad Airways and Qatar Airways and their competitive position against the major European hubbing airlines // J. Air Transport Management. 2018. Vol. 69. P. 257–268.
- Park Y., Lee S., Yoo K.E.* Continuous connectivity model for the evaluation of hub-and-spoke operations // 12th WCTR, July 11–15, 2010, Lisbon, Portugal. 2010.
- Seredyński A., Rothlauf F., Grosche T.* An airline connection builder using maximum connection lag with greedy parameter selection // J. Air Transport Management. 2014. Vol. 36. P. 120–128.
- Veldhuis J.* The competitive position of airline networks // J. Air Transport Management. 1997. Vol. 3. № 4. P. 181–188.
- Wang Y. et al.* SE-DEA-based Approach to Determining the Hub Growth Potential of Airports // J. Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1486. P. 072017.
- Zeigler P. et al.* Low-cost carrier entry at small European airports: Low-cost carrier effects on network connectivity and self-transfer potential // J. Transport Geogr. 2017. Vol. 60. P. 68–79.

## Evaluation of Conditions and Factors for the Formation of Regional Air Hubs in Yekaterinburg, Tyumen, Novosibirsk and Krasnoyarsk

O. V. Sorokin<sup>1</sup>, \* and A. S. Voloshok<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, Russia

\*e-mail: sorokin.oleg.98@mail.ru

The article proposes a methodology for assessing the conditions and factors that contribute to the formation of regional air hubs. As conditions, the following are considered: the transport and geographical location and

local demand's volume, as factors—airport throughput, representation of the base air carrier, infrastructure for transfer and the quality of the take-off and landing schedule. For the analysis, four airports: Koltsovo (Ekaterinburg), Roschino (Tyumen), Tolmachevo (Novosibirsk) and Emelyanovo (Krasnoyarsk) were selected that are most suitable for the formation of a regional air hub in them. These airports serve the largest cities and are located on the outskirts of their territorial groupings of cities facing other territorial groupings of cities between which the transfer will be carried out, which is the best combination for forming a regional hub. A regional hub is an airport in a non-capital city that specializes in servicing transfer transportation between different parts of the country. For each condition and factor, the actual or calculated value of the indicator is given and normalized from 0 to 1. Due to the constancy of conditions for a short period of time, in order to increase the potential for the formation of an air hub, the airport administration needs to work with factors, among which the most important, flexible in terms of speed and cost of implementation is the factor of the aviation schedule of take-offs and landings. According to the results of the analysis, the Yekaterinburg airport has optimal conditions for the formation of a hub, but the administration of the Novosibirsk airport operates with factors better, for example, it works on the convenience of transfer connections, interacting with the base air carrier.

*Keywords:* air transport, air hubs, conditions and factors, passenger air transportation, transfer passengers

## REFERENCES

- Antonov E.V., Makhrova A.G. Largest Urban Agglomerations and Forms of Settlement Pattern at the Supra-Agglomeration Level in Russia. *Reg. Res. Russ.*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 370–382. <https://doi.org/10.1134/S2079970519040038>
- Chang Y.C., Lee W.H., Hsu C.J. Identifying competitive position for ten Asian aviation hubs. *Transp. Policy*, 2020, vol. 87, pp. 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.01.003>
- Cook G.N., Goodwin J. Airline networks: A comparison of hub-and-spoke and point-to-point systems. *J. Aviat. Aerosp. Education Res.*, 2008, vol. 17, no. 2, 1 p. <https://doi.org/10.15394/jaer.2008.1443>
- Dai L., Derudder B., Liu X. The evolving structure of the Southeast Asian air transport network through the lens of complex networks, 1979–2012. *J. Transp. Geogr.*, 2018, vol. 68, pp. 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.02.010>
- Gil'ts N.E., Novosel'skii N.K. Opportunities for the development of Krasnoyarsk International Airport into an aviation hub. *Ekonomika i Upravlenie: Nauch.-praktich. Zh.*, 2021, no. 3, pp. 143–148. (In Russ.).
- Ginzubrg E.S. Improving the spatial organization of aviation transport in Russia: *Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow, 2009. 158 p.
- Gorkin A.P., Smirnyagin L.V. On the factors and conditions of the placement of capitalist industry. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geogr.*, 1973, no. 3, pp. 68–72. (In Russ.).
- Huston J.H., Butler R.V. Airline hubs in the single European market: A benchmark analysis. *Rev. Ind. Organ.*, 1993, vol. 8, no. 4, pp. 407–417.
- Logothetis M., Miyoshi C. Network performance and competitive impact of the single hub – A case study on Turkish Airlines and Emirates. *J. Air Transp. Manag.*, 2018, vol. 69, pp. 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.10.003>
- Lyashenko E.V. Modern features of domestic air links in Russia. *Geogr. v Shkole*, 2015, no. 4, pp. 3–8. (In Russ.).
- Neretin A.S. Spatial Structure of Passenger Air Services in European Russia. *Reg. Res. Russ.*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 67–83.
- O'Connell J.F., Bueno O.E. A study into the hub performance Emirates, Etihad Airways and Qatar Airways and their competitive position against the major European hubbing airlines. *J. Air Transp. Manag.*, 2018, vol. 69, pp. 257–268.
- Park Y., Lee S., Yoo K.E. Continuous connectivity model for the evaluation of hub-and-spoke operations. 12th WCTR, July 11–15, 2010, Lisbon, Portugal. 2010.
- Seredyński A., Rothlauf F., Grosche T. An airline connection builder using maximum connection lag with greedy parameter selection. *J. Air Transp. Manag.*, 2014, vol. 36, pp. 120–128.
- Sorokin O.V., Samburov K.V. Zones of gravity of passenger traffic in Moscow and St. Petersburg. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 5. Geogr.*, 2021, no. 6, pp. 135–147. (In Russ.).
- Tarkhov S.A. Changes in the air transport connectivity of Russian cities in 1990–2015. *Reg. Res. Russ.*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 127–145. <https://doi.org/10.1134/S2079970517020095>
- Veldhuis J. The competitive position of airline networks. *J. Air Transp. Manag.*, 1997, vol. 3, no. 4, pp. 181–188. [https://doi.org/10.1016/S0969-6997\(97\)86169-8](https://doi.org/10.1016/S0969-6997(97)86169-8)
- Wang Y. et al. SE-DEA-based Approach to Determining the Hub Growth Potential of Airports. *J. Physics: Conference Ser.*, 2020, vol. 1486, p. 072017.
- Yaroshevich N.Yu., Vyazovskaya V.V. Formation of airport hubs in the Russian Federation: assessment of prospects. *Transp. Ross. Federatsii*, 2011, no. 4 (35), pp. 59–62. (In Russ.).
- Zeigler P. et al. Low-cost carrier entry at small European airports: Low-cost carrier effects on network connectivity and self-transfer potential. *J. Transp. Geogr.*, 2017, vol. 60, pp. 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.02.011>

## ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 911.5/9

### ЛАНДШАФТНЫЕ ИНВАРИАНТЫ – ПАРАМЕТРЫ ПОРЯДКА ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© 2023 г. А. С. Байбар<sup>a, b, c, \*</sup>, М. Ю. Пузаченко<sup>a</sup>, Р. Б. Сандлерский<sup>b, c</sup>, А. Н. Кренке<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>b</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

<sup>c</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

\*e-mail: baybaranastasia@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.05.2021 г.

После доработки 09.02.2023 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

В статье рассматриваются методологические обоснования проблемы выделения инвариантов нелинейных динамических систем в ландшафтоведении. Понятие инвариантности в контексте существования устойчивых во времени пространственных структур в ландшафте было предложено В.Б. Сочавой (1961). С накоплением многолетних рядов наблюдений состояний ландшафта посредством мультиспектральной съемки, выделение таких инвариантов стало осуществимо на практике. На примере анализа мультиспектральных измерений отражения солнечной радиации для южно-таежного ландшафта (Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник) со спутников серии Landsat с 1987 по 2022 г. показано, что инварианты, последовательно выделяемые методом главных компонент как параметры порядка, в первую очередь определяют общую надземную биомассу растительности, содержание воды в растительности и почвах и интенсивность фотосинтеза, т.е. биопродукционного процесса. Предложенная схема анализа временных рядов дистанционной информации позволяет оценивать ландшафтный покров в момент съемки относительно инварианта как предельного стационарного состояния ландшафта и выявлять основные управляющие параметры, определяющие изменения условий среды и саморазвитие системы. Для выявления физического смысла полученных инвариантов был проанализирован вклад растительности и рельефа в формирование его структуры. Показано, что рельеф слабо влияет на параметры порядка, а наибольший вклад в формирование инвариантной структуры вносят характеристики растительного покрова. Так как инварианты позволяют выделить наиболее стационарные состояния, то очевидны возможности их применения для решения прикладных задач в сельском и лесном хозяйстве, а также в оценке различных экосистемных услуг.

*Ключевые слова:* параметры порядка, инвариант, синергетика, Landsat, МДДЗ, ЦЛГПБЗ, метод главных компонент, геоботанические описания, морфометрические характеристики рельефа, южно-таежный ландшафт, юг Валдайской возвышенности

**DOI:** 10.31857/S2587556623030056, **EDN:** QQWOKE

#### ВВЕДЕНИЕ

Развитие средств измерения свойств ландшафта позволило применить к анализу его функционирования методический подход, основой которого является представление о ландшафте, как о сложной динамической системе (Пузаченко, 2010). Согласно теории динамических систем, состояние системы – есть положение ее элементов в пространстве признаков в момент времени, а собственно “динамическая система” – процесс смены этих состояний. Объем накопленных данных мультиспектральной съемки позволяет исследователям оперировать рядами измерений отраженной солнечной радиации в различных спектральных диапазонах. Результат одного тако-

го измерения – набор функциональных переменных, отражающих процессы преобразования солнечной энергии растительным покровом в зависимости от положения в рельефе, погодных условий и других факторов. Располагая таким набором состояний, мы получаем возможность “отследить” траекторию как отдельных элементов, так и всей системы в целом. Траектории в соседних точках могут иметь различную степень подобию. Группы соседних точек с подобными траекториями образуют аттрактор, определяемый единым механизмом регулирования флуктуаций среды, и могут быть ассоциированы с целостными пространственными системами. Группы соседних точек с различными траекториями образуют конти-

нуум, в общем случае отражающий изменяющиеся в пространстве и/или времени механизмы функционирования. Соотношения в пространстве между этими крайними формами аттрактора определяют уровень организации ландшафта. Теория динамических нелинейных систем позволяет моделировать эти аттракторы. В ее рамках развиты представления о диссипативных системах и методы оценки устойчивости движения. Заданную таким образом динамическую систему можно исследовать на протяжении различных временных интервалов (сутки, сезоны, многолетние циклы).

Накопление мультиспектральной дистанционной информации позволяет сформулировать цель настоящей статьи – разработка методологии анализа реальных рядов измерений функциональных переменных ландшафта, отображающих в первую очередь работу растительного покрова по преобразованию солнечной энергии. Этот подход должен создать основу максимально полного использования мультиспектральных дистанционных измерений со спутников и БПЛА в различных временных диапазонах.

В качестве теоретико-методологического основания для исследования пространственно-временной динамики геосистем может рассматриваться синергетика. Введенное одним из ее основоположников Г. Хакеном (1980) представление о параметрах порядка системы – небольшом числе независимых переменных, определяющих все наблюдаемое разнообразие состояний функциональных переменных системы, практически тождественно представлению об инварианте геосистемы В.Б. Сочавы (1978) как некоторой пространственной структуры, неизменной на определенном временном интервале. Синергетика, в свою очередь, наряду с отрицательными обратными связями, порождающими осцилляторы, рассматривает и положительные обратные связи – основу самоорганизации.

В настоящем сообщении сделана попытка обобщить современные теоретические представления об инвариантах как параметрах порядка геосистем и продемонстрировать их выделение и семантическую интерпретацию на примере ряда измерений отраженной солнечной радиации съемочными системами спутников семейства Landsat для хорошо изученной дистанционными и наземными методами территории Центрально-Лесного заповедника (Тверская область).

## ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Термин “инвариант” (от латинского “invariant” – неизменяющийся) был введен английским математиком Джеймсом Джозефом Сильвестром в середине XIX в. Тогда же совместно с А. Кэли им

была разработана алгебраическая теория инвариантов, изучающая неизменяющиеся или частично изменяющиеся при замене линейных переменных многочлены или рациональные функции (Бородин и др., 1979). Во второй половине XIX в. теория инвариантов оформилась как самостоятельная математическая дисциплина, которую в последующие годы развивал Давид Гильберт. В первую половину 20 в. термин использовался только для объяснения неизменных величин в алгебре и геометрии. Но в последующие годы ввиду его универсальности он постепенно вошел практически во все науки: физику, программирование, экономику, лингвистику, философию, географию и т.д.

В географию термин “инвариант” был введен в период внедрения теории сложных систем, идей кибернетики, моделирования и математических методов в естественные науки. Сделал это В.Б. Сочава, по мнению которого инвариант ландшафта – это совокупность свойств геосистемы, которые остаются неизменными при ее преобразовании (1978, с. 293). А.А. Крауклис (1979) вслед за В.Б. Сочавой рассматривал инвариантность как неотъемлемый атрибут структуры ландшафта. В то же время В.С. Преображенский (Преображенский, Александрова, 1975, с. 400), признавая важность этого понятия для определения динамики и эволюции ландшафта, указывал на отсутствие критериев выделения инвариантной ландшафтной структуры, ее границ и методов, определяющих ее в полевых условиях.

Ф.Н. Мильков принципиально переосмыслил термин “инвариант ландшафта”, определив инвариантность как наиболее общие и устойчивые черты структуры типа ландшафтного комплекса на уровне семейства (Бевз, 2002), а “инвариант ландшафта” как его типовую структуру на разных иерархических уровнях (Мильков, 1986). Он считал, что “инвариант” заменил понятие “тип”, а вместе с тем и “тип ландшафта, местности и урочища”, принятые ранее в отечественной географии. В трактовке термина по Милькову исчезла связь инварианта с динамической системой, которую имел в виду В.Б. Сочава (1978). После переосмысления понятия Ф.Н. Мильковым в литературе распространяется “статическое” представление об инварианте, его ассоциируют с наиболее инертными компонентами ландшафта: с литогенной основой (Бевз, 2002; Большаков, 2004; Васильев и др., 2009) или с почвой (Петришев и др., 2011). Таким образом, в начале XXI в. статическое представление об инварианте, весьма далекое от идей В.Б. Сочавы, стало наиболее “популярным” в ландшафтоведении. Так, например, Г.С. Макунина использует термин гидротермический инвариант, под которым она понимает годовые средне-многолетние показатели количества осадков, стока и валовой влагообеспеченности почвы (Макунина,

2011). В то же время оно продолжает восприниматься исследовательским сообществом в целом как весьма абстрактное. По мнению Д.В. Черных (2015), инварианты, предложенные В.Б. Сочавой, до сих не исследованы, не раскрыты на региональном материале и вызывают недопонимание у большинства физико-географов и ландшафтоведов. Абстрактность понятия и потеря его связи с собственно динамикой системы, определялась в значительной степени тем, что наука не располагала долговременными временными рядами измерений каких-либо переменных, отображаемых в пространстве, на основе которых можно осуществить выделение инвариантов.

В англоязычной географии и ландшафтной экологии подход с позиции динамических систем развит слабо. Это определяется начальными эмпирическими постулатами мозаики, определенными Форманом и Годроном (Forman, 1995; Forman and Godron, 1986). В основополагающих работах Тюрнера, О'Нила и Ву (Turner, 1989, 2005; Turner et al., 2001; O'Neill et al., 1988; Wu, 2004, 2006) ставится проблема масштаба с различных логически обосновываемых позиций, без какого-либо обращения к теореме отчета, являющейся строго математической основой влияния частоты измерений на отображения переходных зон и границ. Вводятся представления об иерархии (O'Neill et al., 1986), опирающиеся практически только на феноменологию (Allen and Starr, 1982), полностью игнорируя теорию нелинейных динамических систем, воспроизводящую основные формы иерархии и механизмы их возникновения. Работы, обращающиеся к простейшим моделям динамических систем, редки и не имеют какого-либо приложения к задачам с нелинейной динамикой (Gobattoni et al., 2013). Таким образом, идея рассматривать ландшафт как сложную нелинейную динамическую систему развивается, в основном, в рамках отечественной науки.

#### РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ИНВАРИАНТАХ В РАБОТАХ Ю.Г. ПУЗАЧЕНКО

Исходное представление об инварианте, как неизменном на данном интервале времени параметре динамической системы, последовательно развивал Ю.Г. Пузаченко (1983, 2010, 2019). В его работе "Инвариантность геосистем и их компонентов" (1983) формулируются основные механизмы-условия инвариантности динамической системы: принцип многосвязности и принцип компенсирующих связей (двухканальности).

**Принцип многосвязности.** Так как в природе нет систем, абсолютно не реагирующих на внешние возмущения, то предлагается рассматривать относительную инвариантность, то есть смену состояний, происходящую в пределах  $\pm \varepsilon$  и явля-

ющуюся несущественной. При этом вероятность отклонения функции системы ( $F$ ) от среднего, за пределы интервала  $[F - \varepsilon; F + \varepsilon]$ , оценивается через дисперсию.

При слабо коррелирующих входных переменных инвариантность функции тем больше, чем больше число аргументов:

$$F = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \dots + a_nX_n, \quad (1)$$

где  $F$  – функция системы,  $X_i$  – входные аргументы (переменные),  $a_i$  – коэффициенты, принадлежащие интервалу  $[0;1]$ . При  $\sum_1^n a_i = 1$  дисперсия функции ( $DF$ ) может быть найдена по формуле:

$$DF = a_1^2DX_1 + a_2^2DX_2 + \dots + a_n^2DX_n. \quad (2)$$

Если дисперсии входных аргументов равны, то минимум дисперсии функции будет достигаться при одинаковых коэффициентах:

$$\min DF = DX_i/n. \quad (3)$$

Однако, если они не равны, то минимум дисперсии функции будет наблюдаться при коэффициентах  $a_i$  обратно пропорциональных  $DX_i$ . Дисперсия функции, зависящей от нескольких переменных, при неравенстве отклонений всегда заведомо ниже, чем максимальная дисперсия переменных ( $DF \leq \max(DX_i)$ ). Данное утверждение справедливо и при взаимосвязанных аргументах  $X_i$ . Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением многосвязности дисперсия функции системы будет меньше при большем количестве аргументов, то есть с большей вероятностью значения будут принадлежать интервалу  $\pm \varepsilon$ . В результате, сложные системы обладают большей инвариантностью, чем простые. Следовательно, инвариантность системы может быть оценена через количество факторов, определяющих систему, а факторный и дисперсионный анализ, метод главных компонент являются основными статистическими методами, позволяющими оценить инвариантность реально существующих природных объектов (Пузаченко, 1983).

**Принцип компенсирующих связей (двухканальности).** Необходимое и достаточное условие реализации инвариантной системы – присутствие двух и более каналов, передающих возмущение, а их эквивалентная компенсирующая функция равна нулю (Самонастраивающиеся ..., 1969).

Функция системы  $F$  имеет два канала  $F_1$  и  $F_2$ , принимающих из внешней среды сигналы  $X_1, \dots, X_n$  с некоторой константой  $C$ .

$$F = F_1 + F_2 + C, \quad (4)$$

$$F_1 = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n, \quad (5)$$

$$F_2 = b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n. \quad (6)$$

Значения  $F$  остаются постоянными при любых значениях аргументов, если  $a_i = -b_i$ . В данном случае два канала компенсируют любые возмущения переменных.

Основываясь на определении положения элементов системы в многомерном векторном пространстве, можно сделать еще одно простое, но не менее важное обобщение через скалярное произведение векторов.

$$(a, b) = |a||b| \cos\varphi, \quad (7)$$

$$\cos\varphi = \frac{(a, b)}{|a||b|}. \quad (8)$$

При  $\cos\varphi = 0$  отсутствует двухканальная компенсация, при  $\cos\varphi < 0$  – компоненты взаимодополняют друг друга, компенсация работает лишь частично, при  $\cos\varphi = -1$ , компоненты полностью компенсируют друг друга, при  $\cos\varphi > 0$  – неполная инвариантность за счет многосвязности, а при  $\cos\varphi = 1$  – система полностью не инвариантна.

Принцип компенсирующих связей был использован при исследовании хвойно-широколиственные сообществ Дальнего Востока в работах Пузаченко и Скулкина (Пузаченко, Скулкин, 1972; Скулкин, 1979). Ими было показано, что три вида хвойных пород деревьев попарно компенсируют друг друга, то есть при всех комбинациях два вида взаимокompенсируются, а третий встречается в виде подростка с высоким обилием: ель аянская и кедр корейский являются взаимодополняющими, а им противопоставляется пихта белокорая, поэтому в реальных биоценозах будут встречаться сочетания пихты с елью или пихты с кедром. В целом, хвойно-широколиственные леса юга Дальнего Востока характеризуются средней степенью инвариантности, то есть они являются устойчивыми, но существуют возмущения, которые способны привести к смене состояния системы. В цитируемых работах показано, что принцип многоканальной компенсации возмущения из внешней среды можно считать одним из главных способов, способствующих инвариантности основных функций биоценозов и фитоценозов.

Данные принципы дают общий подход к исследованию инвариантности системы, образованной множеством элементов. В частности, общую оценку инвариантности можно получить, вычислив определитель квадратной матрицы, состоящий из всевозможных скалярных векторных произведений коэффициентов при аргументах функций  $F_1, F_2, \dots, F_n$ . Однако, оценить и исследовать инвариантность некоторой системы можно и не обращаясь к анализу отношений между коэффициентами частных функций. Если аргументы независимы, то величины коэффициентов корреляции между состояниями любой пары элементов отражают ту же зависимость, что и скалярные

векторные произведения, вычисленные для той же пары. Если вид зависимости функции от входных переменных неизвестен, то оценку инвариантности и исследование масштабов взаимокompенсации элементов к неизвестному множеству возмущений можно осуществить на основе матрицы парных коэффициентов корреляции. Если коэффициент корреляции между двумя элементами отрицательный, то эти элементы, скорее всего, находятся в существенно компенсаторных отношениях; если равны нулю, то элементы линейно независимы и инвариантность системы обеспечивается на данном уровне за счет механизма многосвязности. Если коэффициенты корреляции положительные, то данная пара элементов не увеличивает, а снижает инвариантность. Чем больше в системе отрицательных и нулевых значений парных коэффициентов корреляции, тем она более инвариантна. Общей оценкой инвариантности системы может быть определитель корреляционной матрицы. Если в матрице большое значение имеют коэффициенты корреляции близкие к нулю, то переход от одних сочетаний элементов к другим в пространственно-временных координатах, в которых организована выборка, постепенный; если же большое значение имеют отрицательные коэффициенты, то – дискретный. Возможна и энтропийная оценка инвариантности:

$$R = 1 - H(Y_1, Y_2 \dots Y_n) / [H(Y_1) + H(Y_2) + \dots + H(Y_n)]. \quad (9)$$

Если  $R = 0$ , то система инвариантна в смысле высокой многосвязности, так как все элементы и все их комбинации независимы. Оценка на основе матрицы корреляции не учитывает нелинейных и неаддитивных отношений, но зато хорошо выделяет взаимокompенсирующие элементы. Сочетание этих оценок позволяет дать более полное представление о степени и характере инвариантности системы к произвольному множеству возмущений.

Если некоторая функция системы по линии обратной связи поддерживает такое сочетание элементов, при котором достигается наибольшая ее инвариантность, то такая система будет автоматически поддерживать на фоне внешних возмущений свою оптимальную в смысле инвариантности структуру. Войдя случайно в инвариантное состояние, система будет находиться в нем сколь угодно долго, и только экстраординарные возмущения могут привести ее к резкой перестройке. Именно такого рода отношения в значительной степени определяют возможность выделения некоторых относительно дискретных пространственно-временных образований, сохраняющих определенное постоянство своей структуры на фоне неизбежных внешних возмущений.

Таким образом, согласно Ю.Г. Пузаченко (1983), инвариантность – это результат двух ти-

пов отношений: многосвязности и многоканальной компенсации. В отношении реальных природных систем можно утверждать, что в них одновременно представлены все формы обеспечения инвариантности. Представим себе некоторый процесс, при котором система изменяет свое функционирование и структуру под воздействием изменяющихся внешних условий среды. Этот процесс изменений характеристик систем прекратится, как только будет найдена такая структура, которая обеспечит неизменное функционирование и неизменность самой системы к широкому диапазону внешних условий. Обеспечение инвариантности системы через многоканальность, при которой элементы выступают как дополняющие и уравнивающие друг друга, приводит, в частности, к пространственной дискретности геосистем при малой площади переходных областей. Обеспечение инвариантности за счет многосвязности и линейной независимости элементов, напротив, предопределяет континуальность. При этом дискретность проявляется в одних свойствах систем, а континуальность в других. Можно сказать, что один принцип инвариантности обеспечивает существование однородной в пространственно-временных координатах части системы (аттрактора), с постоянной структурой, а другой осуществляет объединение этих частей в непрерывное целое, которое, в свою очередь, обладая собственными компенсирующими механизмами, является относительно однородной частью еще большей системы.

Дальнейшее развитие рассматриваемый подход к оценке инвариантности получил уже в 2000-е годы. Новым стимулом к его развитию послужили развитие теоретико-методологической базы исследования сложных систем – синергетики, в частности последние работы Г. Хакена (2001), развитие средств статистической обработки данных (компьютеры и статистические программы) и появление достаточного для анализа объема мультимедийных гиперспектральных данных дистанционного зондирования. Существование системы измерения отраженной солнечной радиации в различных спектральных каналах позволило рассматривать серии съемочных сцен в качестве набора временных срезов, фиксирующих состояния динамической геосистемы. Таким образом, появилась возможность рассматривать многолетнюю динамику каждого элемента системы (элементарной ячейки территории, пикселя) в системе постоянных координат поглощенной/отраженной солнечной энергии и теплового потока в каждом канале и/или наборе термодинамических переменных и/или спектральных индексов, характеризующих функционирование геосистемы. Первые результаты выделения инварианта на этой методологической основе были опубликованы в (Сандлерский, 2007; Сандлерский, Пузаченко, 2007). В этих работах

рассмотрены инварианты термодинамических характеристик преобразования ландшафтом солнечной энергии, рассчитанных по серии сцен мультиспектральной съемки Landsat 5, 7 с разрешением  $30 \times 30$  м в пикселе. Статья Ю.Г. Пузаченко (2010) посвящена выделению инвариантов в варьировании глобальных среднемесячных температур с разрешением  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  за период с 1902 по 2002 г. В этих работах практически сформулированы основные положения теоретико-методологического подхода к выделению инвариантов ландшафта, как динамической системы. Процесс – это смена состояний определенного пикселя, пространственно-временной процесс – смена состояний во всех точках (пикселях) территории исследования (Пузаченко, 2010). Порядок в смене состояний в пространстве определяет структуру. Движение точки в пространстве измеренных переменных определяется сменой состояний этого пикселя во времени. С помощью съемочных систем спутников и дронов можно фиксировать состояния траекторий, которые пересекают поверхность (сечение Пуанкаре). Так как рассматриваемые переменные имеют разную инертность, то есть скорость изменения, порождаются сходящиеся и расходящиеся траектории, иерархически вложенные друг в друга. Процесс эволюции определяется механизмами преобразования вещества и энергии, в общем случае физическими причинами. Система уравнений, описывающих данные механизмы, определяет динамическую систему, например, классическая модель тепло-массообмена Лоренца. Параметр порядка описывается каждым из уравнений. Таким образом, инварианты (параметры порядка) – это процессы, которые можно рассматривать как ортогональные координаты движущейся в фазовом пространстве точки. Согласно принципам синергетики, существуют и управляющие переменные, которые оказывают влияние на параметры порядка, например, естественные смены растительности, климат, рельеф и т.д. (Пузаченко, 2010).

#### МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ СЦЕН СПУТНИКОВЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Проблема выделения инвариантного состояния ландшафта на основе мультиспектральной съемки в частном случае может иметь решение в объединении различных каналов и/или сцен с последующим расчетом интегрального, или эталонного изображения. При этом такое отображение должно быть свободно от артефактов съемочной системы (искажения, облачность) и максимально информативным.

Анализ литературы показал, что существуют разные подходы к выделению интегрального

изображения по космическим снимкам в зависимости от задач, для которых они рассчитываются.

Во-первых, “*image compositing*” – компоновка изображений, построение составного безоблачного изображения с целью уменьшения объема данных спутниковой информации и минимизации атмосферного влияния. Алгоритмы для расчета преимущественно проработаны для снимков с низким пространственным разрешением, например, для AVHRR (Holben, 1986) и MODIS (Luo et al., 2008), однако существуют исследования, реализованные и для съемки Landsat (Griffiths et al., 2013; Potapov et al., 2011; Roy et al., 2010; White et al., 2014; Zhu et al., 2015). Первый алгоритм для Landsat был разработан в (Roy et al., 2010), он применялся к изображениям, полученным съемочной системой ETM+ (Landsat 7) для всей территории США. Метод основывается на совместном использовании максимальных значений нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) и яркостной температуры (Brightness temperature). Однако уже через год Потапов с соавт. (Potapov et al., 2011) предложил использовать медианные значения ближнего инфракрасного канала (NIR) в качестве критерия для отбора “идеальных” наблюдений вместо максимального NDVI. Дальнейшие исследования методов построения комбинированного изображения связаны с разработкой бальной системы оценивая снимков Landsat. Например, в (Griffiths et al., 2013) авторы предложили оценивать каждое наблюдение со спутника, а компоновку изображения осуществлять на основе взвешенных баллов. В данном подходе основными критериями можно считать дату (год и день в году), расстояние каждого пикселя от облака (из Fmask) (Griffiths et al., 2013). Дополнительные критерии предложили авторы работы (White et al., 2014), по их мнению, дополнительно нужно учитывать тип датчика, расстояние от пикселя до тени облака и непрозрачность атмосферы (из LEDAPS). Некоторые авторы использовали безоблачные снимки Landsat для оценки серии временных данных для каждого пикселя и канала и показали возможность с их помощью прогноза ежедневных синтетических данных Landsat при условии чистого неба (Zhu et al., 2015).

Во-вторых, “*image fusion*” – слияние изображений с целью улучшения пространственного разрешения (Коберниченко, Тренихин, 2007). Можно выделить несколько основных методов получения интегрального изображения: метод главных компонент (*Principle component analysis*, PCA) (Campbell and Congalton, 2012; Cao et al., 2003; Chang and Yoon, 2003; Kwarteng and Chavez, 1989; Metwalli et al., 2010; Naidu and Raol, 2008; Riasati and Zhou, 2005; Shahdoosti and Ghassemian, 2012), преобразование интенсивность–оттенок–насыщенность (*Intensity–hue–saturation*, IHS) (Choi, 2006; Tu et al., 2001a, 2001b), преобразование Брови (*Brovey transform*),

вейвлет-преобразование (*Wavelet transform*) (Naidu and Raol, 2008; Nunez et al., 1999) и т.д. Данные методы, как правило, используются для объединения мультиспектральных и панхроматических каналов с целью получения цветного изображения с высоким разрешением. Метод главных компонент применяется к временным сериям снимков Landsat с одинаковым разрешением для всех исходных каналов совместно, с выделением общих компонент, характеризующих 2–3 показателя: яркость, зеленость (Ingebritsen and Lyon, 1985), влажность (Campbell and Congalton, 2012).

Рассмотренные методы хоть и предназначены для слияния изображений, уменьшения признакового пространства, но не совсем подходят для выделения инвариантов в контексте сложных динамических систем. В работах Пузаченко, Кренке, Сандлерского и др. (Пузаченко, 2010; Пузаченко и др., 2019; Кренке и др., 2019) показано, что методы оценки параметров порядка прямо связаны с алгебраическими моделями снижения размерности: методом главных компонент, факторным анализом, многомерным шкалированием, кластер-анализом, дискриминантным анализом. Они широко применяются в экологии, географии, экономике и социологии, где чаще всего используются для отображения положения переменных в пространстве ортогональных векторов конечной размерности. Преобразование векторного пространства в пространство Евклида позволяет вычислить численные значения этих координат. Все исходные (подчиненные) переменные описываются от этих координат через линейные или нелинейные уравнения регрессии со специфическими параметрами. Формально получаем преобразование исходных переменных с очень большой размерностью в пространство со значительно меньшей размерностью при минимальной потере информации, что возможно, так как между переменными – функциями общих параметров – неизбежно существуют корреляции, отличные от нуля. Кластерам с наиболее коррелированными переменными соответствуют свои собственные параметры порядка.

Алгебраические процедуры снижения размерности и представления множества измеренных переменных как линейных функций обычно очень небольшого числа параметров порядка сами по себе не дают никаких оснований для их физической интерпретации. Однако практика анализа различных явлений природы показывает, что этот смысл идентифицируется как через переменные, включенные в анализ, так и через внешние переменные, функционально связанные с исследуемым явлением (Пузаченко, 2010). Так, наиболее подходящим для выделения инвариантов (параметров порядка) является метод главных компонент (факторный анализ). Процедура выделения факторов сводится к вращению, макси-

**Таблица 1.** Результаты обобщения шести каналов для каждого срока съемки, безоблачные сцены Landsat 4–9

№	Дата съемки (дд/мм/гг)	Доля общей дисперсии главных компонент снимков			Сумма дисперсий
		яркость всех каналов	яркость БИК канала	яркость КИК каналов	
1	04/02/87	0.74	0	<b>0.20</b>	0.94
2	06/06/88	0.76	<b>0.19</b>	0.03	0.98
3	03/05/90	0.89	<b>0.08</b>	0.02	0.99
4	27/04/00	0.88	<b>0.08</b>	0.03	0.99
5	27/09/00	0.80	<b>0.08</b>	0.07	0.95
6	22/03/01	0.96	0	<b>0.03</b>	0.99
7	10/04/02	0.63	0.03	<b>0.32</b>	0.98
8	20/06/02	0.80	<b>0.16</b>	0.02	0.98
9	11/02/07	0.96	0	<b>0.03</b>	0.99
10	03/06/07	0.75	<b>0.17</b>	0.04	0.96
11	17/02/15	0.68	0	<b>0.31</b>	0.99
12	23/03/16	0.93	0	<b>0.06</b>	0.99
13	06/02/17	0.85	0	<b>0.13</b>	0.98
14	14/04/18	0.67	0.07	<b>0.26</b>	1
15	17/04/19	0.79	0.08	<b>0.12</b>	0.99
16	04/06/19	0.79	<b>0.17</b>	0.03	0.99
17	26/09/20	0.83	<b>0.08</b>	0.06	0.97
18	17/02/21	0.95	0	<b>0.05</b>	1
19	24/03/22	0.86	0	<b>0.14</b>	1

мизирующему дисперсию исходного пространства переменных путем поиска линии регрессии. После того, как определена линия регрессии, для которой дисперсия максимальна, вокруг нее остается некоторый разброс данных. И процедура повторяется вновь. Таким образом, факторы последовательно выделяются один за другим. Так как каждый последующий фактор определяется таким образом, чтобы максимизировать изменчивость, оставшуюся от предыдущих, то факторы оказываются взаимонезависимыми или ортогональными. В результате, в процессе последовательного выделения факторов, они включают в себя все меньше изменчивости (дисперсии).

#### ВЫДЕЛЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИНВАРИАНТОВ ОТРАЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В КАНАЛАХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ LANDSAT 4–9

**Территория и материалы исследований.** Апробация метода выделения инвариантов отражения была выполнена для южно-таежного ландшафта юга Валдайской возвышенности (Центрально-Лесной государственный биосферный заповедник и прилегающей территории). Исследование проводится в прямоугольнике с координатами углов: 32.607781 в.д., 56.682393 с.ш.; 33.230169 в.д., 56.682798 с.ш.; 32.611149 в.д., 56.354927 с.ш.; 33.228192 в.д., 56.355327 с.ш. и общей площадью 139 200 га.

В качестве исходных данных были использованы все безоблачные сцены Landsat 4–9 для исследуемой территории. В результате, используются все основные каналы (синий, зеленый, красный, ближний инфракрасный (БИК) и два коротковолновых инфракрасных (КИК) для 19 сцен (табл. 1), выполненных с 1987 по 2022 г. (5 за февраль, 3 за март, 4 за апрель, 1 за май, 4 за июнь и 2 за сентябрь). Данные дальнего(их) ИК каналов были исключены из анализа, так как для многих сроков они имеют артефакты в виде полос, что исключает возможность их совместного анализа с остальными каналами. Также не используются дополнительные относительно Landsat 4–7 каналы съемки Landsat 8–9.

В качестве информации для интерпретации выделяемых инвариантов использованы морфометрические характеристики рельефа (уклон, освещенность с запада и юга, профильная, плановая, продольная и кросс-секционная выпуклость, минимальная и максимальная кривизна, оператор Лапласа), рассчитанные для разных иерархических уровней (Пузаченко и др., 2002) на основе данных SRTM<sup>1</sup> и 1882 геоботанических описания, выполненных с 1993 по 2019 г.

**Методы.** Выделение инвариантов производилось в несколько этапов. На первом – методом главных компонент выполнено обобщение каналов для каждого срока съемки с выделением глав-

<sup>1</sup> Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1>

**Таблица 2.** Результаты интеграции компоненты яркости всех каналов каждого срока съемки, безоблачные сцены Landsat 4–9

Дата (дд/мм/гг)	Факторные нагрузки компоненты яркости всех каналов
	частный инвариант
04/02/87	0.83338
06/06/88	0.76779
03/05/90	0.75210
27/04/00	0.80826
27/09/00	0.86436
22/03/01	0.89288
10/04/02	0.38077
20/06/02	0.82572
11/02/07	0.92588
03/06/07	0.84626
17/02/15	0.91723
23/03/16	0.92830
06/02/17	0.90709
14/04/18	0.68339
17/04/19	0.84035
04/06/19	0.80442
26/09/20	0.80018
17/02/21	0.84226
24/03/22	0.81234
<b>Собственные значения</b>	<b>12.80322</b>
<b>Доля общей дисперсии</b>	<b>0.67385</b>

ных компонент снимков. Число компонент, остающихся в анализе, определяется на основе факторных нагрузок (ФН) каналов съемки таким образом, чтобы все максимальные факторные нагрузки каналов отражались в выделяемых компонентах, а также сохранялись компоненты имеющие относительно высокие ФН с отдельными диапазонами спектра.

На следующем этапе главные компоненты снимков обобщаются методом главных компонент по всем срокам съемки согласно их связи с исходными каналами определяемой на основе ФН. В анализе остаются главные компоненты, имеющие высокие ФН с большинством сроков съемки, либо имеющие сезонную составляющую и долю описания варьирования (собственное значение) больше 1. Полученные главные компоненты, соответствующие заявленным критериям, обозначаются как частные инварианты.

Заключительным этапом расчета инвариантов является выделение общих инвариантов на основе интеграции частных инвариантов методом главных компонент. На этом этапе выделяются главные компоненты, имеющие максимальные ФН для двух и более частных инвариантов, а также, при невыполнении первого условия, имеющих важное функциональное значение для дан-

ной территории, что определяется на экспертном уровне. Рассчитываемые на этом этапе главные компоненты рассматриваются как общие инварианты отражения каналов дистанционной съемки за весь период.

Независимая интерпретация полученных общих инвариантов проводилась от характеристик рельефа для всей территории, от характеристик растительности на основе полевых данных и от характеристик рельефа и растительности совместно с помощью мультирегрессионного анализа на основе значений исправленного  $R^2$ .

**Результаты.** Для снежного периода (февраль–март) выделяется две компоненты для всех каналов: первая – яркость всех каналов, вторая – яркость в КИК каналах (см. табл. 1). Для бесснежного периода выделяется 3 компоненты снимка: первая – яркость всех каналов, вторая и третья – яркость в БИК и в КИК каналах, однако их вклад в описание варьирования различается в зависимости от сезона. Для первой–второй декады апреля характерен высокий вклад в описание варьирования каналов съемки яркости КИК каналов, относительно БИК канала. В конце апреля–мае начинает преобладать в описании варьирования отражение в БИК канале, относительно КИК каналов, а в июне эта тенденция усиливается. В конце сентября вклад в описание всех каналов становится практически равным для с КИК и БИК канала.

Таким образом, исходя из общей физической интерпретации каналов съемки, где общая яркость всех каналов отражает запасы фитомассы, БИК канал чувствителен к содержанию хлорофилла и, соответственно, активности фотосинтеза, а КИК каналы слабее отражаются водой, относительно остальных, прослеживается сезонная смена состояний ландшафтного покрова, от открытого снегом с отсутствием вегетации и различным влагосодержанием, определяемым конкретными погодными условиями, через начало вегетации при активном таянии снега и высоком влагосодержании территории до летнего – с высокой вегетативной активностью растительного покрова при снижении влагосодержания территории и к паритету к концу сентября между вегетационной активностью и влагосодержанием, при их общем небольшом вкладе в описание варьирования всех каналов. В целом, 2–3 компоненты для шести каналов съемки Landsat описывают от 94 до 100% варьирования всех каналов, что говорит о практическом отсутствии потери информации при снижении размерности снимка.

При интеграции компонентов яркости всех каналов (табл. 2) получено, что первый частный инвариант положительно связан практически со всеми сроками съемки максимальными ФН и описывает 67% варьирования первой компоненты всех сроков съемки (рис. 1). Исключение со-

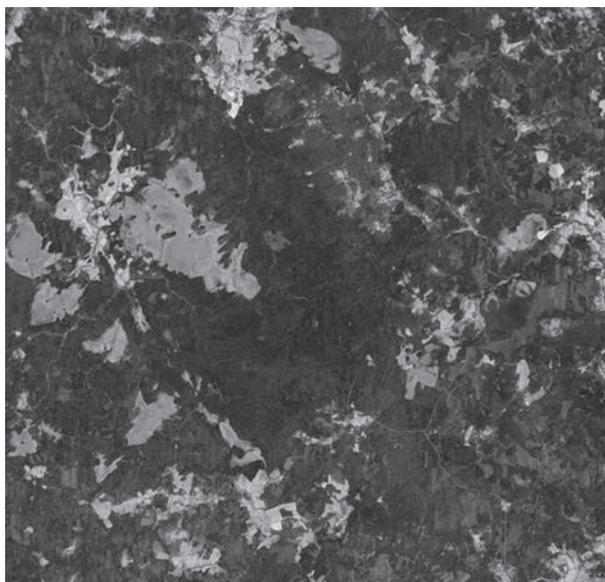


Рис. 1. Частный инвариант яркости всех каналов, Центрально-Лесной заповедник.

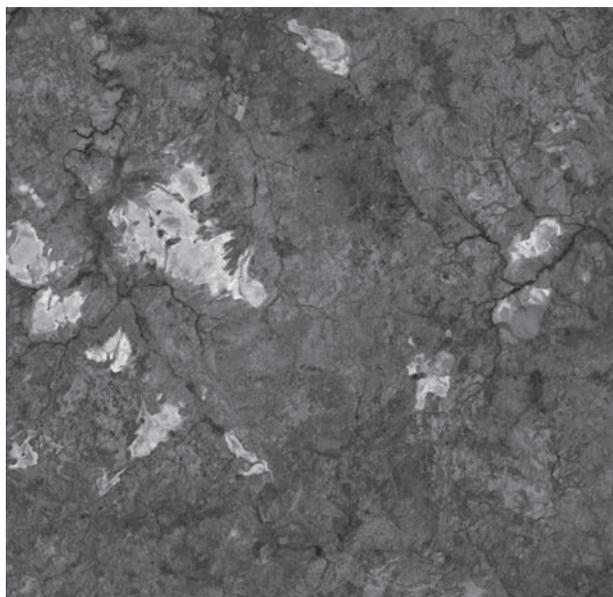


Рис. 2. Частный сезонный инвариант ближнего ИК канала, Центрально-Лесной заповедник.

ставляет съемка 10 апреля 2002 г., которая в большей степени связана со второй компонентой, описывающей 10% общего варьирования. Для компонент общей яркости выделяется один частный инвариант, описывающий интегральную яркость всех каналов за все сроки съемки, высокими значениями выделяющий участки с низкой надземной фитомассой, и, соответственно, наоборот.

Интеграция компонент БИК канала для всех сроков съемки показала (табл. 3), что первый частный инвариант положительно определяется

максимальными ФН для снимков первой–второй декады апреля и 27 сентября 2000 г. и отрицательно – для снимков июня, кроме 6 июня 1988 г., при описании 41% от общего варьирования компонент БИК канала (рис. 2). Второй частный инвариант имеет положительные ФН со всеми сроками съемки при максимальных ФН для снимков от 26 сентября 2020 г., 3 мая 1990 г., 27 апреля 2000 г. и 6 июня 1988 г., при описании 23% общего варьирования (рис. 3). Третья компонента описывает 11% общего варьирования и не имеет значи-

Таблица 3. Результаты интеграции компоненты БИК канала

Дата (дд/мм/гг)	Факторные нагрузки компоненты БИК канала	
	частный сезонный инвариант	частный инвариант
06/06/88	–0.535859	<b>0.558682</b>
03/05/90	0.282146	<b>0.586703</b>
27/04/00	0.409405	<b>0.579390</b>
27/09/00	<b>0.711403</b>	0.390996
10/04/02	<b>0.811353</b>	0.304654
20/06/02	– <b>0.669391</b>	0.577144
03/06/07	– <b>0.753309</b>	0.457787
14/04/18	<b>0.797207</b>	0.238260
17/04/19	<b>0.845519</b>	0.225776
04/06/19	– <b>0.669977</b>	0.513461
26/09/20	0.110937	<b>0.591795</b>
<b>Собственные значения</b>	4.525929	2.502002
<b>Доля общей дисперсии</b>	0.411448	0.227455

Примечание. Максимальные факторные нагрузки для каждого срока съемки обозначены полужирным шрифтом.

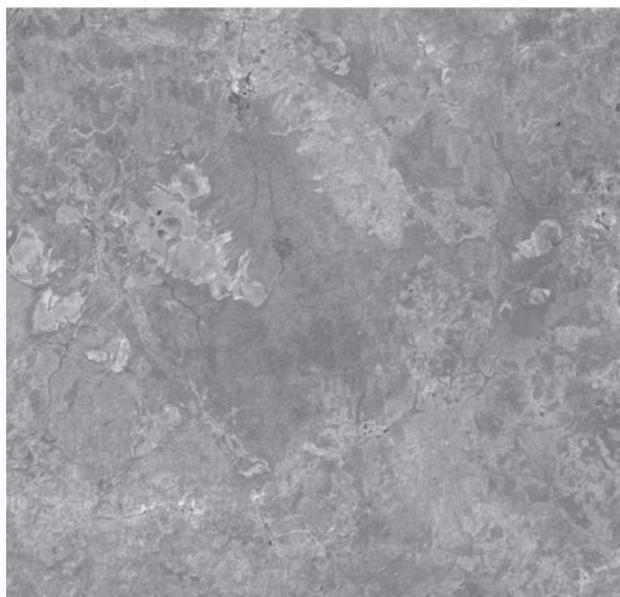


Рис. 3. Частный инвариант ближнего ИК канала, Центрально-Лесной заповедник.

мых ФН с компонентами БИК канала, описывая варьирование БИК канала 26 сентября 2020 г. и 3 мая 1990 г.

Таким образом, для компонент БИК канала выделяется частный сезонный инвариант, определяющий положительными значениями высокую интенсивность вегетации, в первую очередь в начале апреля и низкую летом и наоборот, отрицательными – высокую интенсивность вегетации летом и низкую в начале апреля, а также частный инвариант, положительно определяемый компонентами БИК канала за все сроки съемки, которые вместе описывают 64% общего варьирования ближнего ИК канала.

При интеграции компонент КИК каналов за все сроки съемки первый частный инвариант описывает 29% варьирования при значимых положительных ФН практически со всеми сроками съемки, кроме первой–второй декады апреля, и их максимуме для сроков со снежным покровом (табл. 4). Второй частный инвариант описывает 15% варьирования и максимально положительно

Таблица 4. Результаты интеграции компоненты КИК каналов

Дата (дд/мм/гг)	Факторные нагрузки компоненты КИК каналов		
	частный инвариант	частный сезонный инвариант	частный инвариант первой–второй декады апреля
04/02/87	<b>0.520613</b>	-0.122915	-0.318505
06/06/88	0.333116	<b>0.637648</b>	0.041285
03/05/90	<b>0.582115</b>	0.419630	0.024473
27/04/00	<b>0.506982</b>	0.437316	0.161197
27/09/00	<b>0.446577</b>	0.298440	0.108856
22/03/01	<b>0.568539</b>	-0.311051	-0.188139
10/04/02	-0.057494	<b>-0.457748</b>	<b>0.704343</b>
20/06/02	0.278043	<b>0.453793</b>	0.190542
11/02/07	<b>0.694392</b>	-0.327500	-0.143224
03/06/07	0.397401	<b>0.449149</b>	0.139908
17/02/15	<b>0.857079</b>	-0.278321	-0.089286
23/03/16	<b>0.818790</b>	-0.157741	-0.182876
06/02/17	<b>0.831144</b>	-0.243879	-0.121053
14/04/18	-0.003864	-0.393397	<b>0.789880</b>
17/04/19	0.288102	-0.301763	<b>0.665482</b>
04/06/19	0.433405	<b>0.534643</b>	0.243097
26/09/20	0.418258	0.433313	<b>0.450820</b>
17/02/21	<b>0.548845</b>	-0.220755	-0.109029
24/03/22	<b>0.694933</b>	-0.446638	0.071862
<b>Собственные значения</b>	5.547042	2.828772	2.151703
<b>Доля общей дисперсии</b>	0.291950	0.148883	0.113248

Примечание. Максимальные факторные нагрузки для каждого срока съемки обозначены полужирным шрифтом.

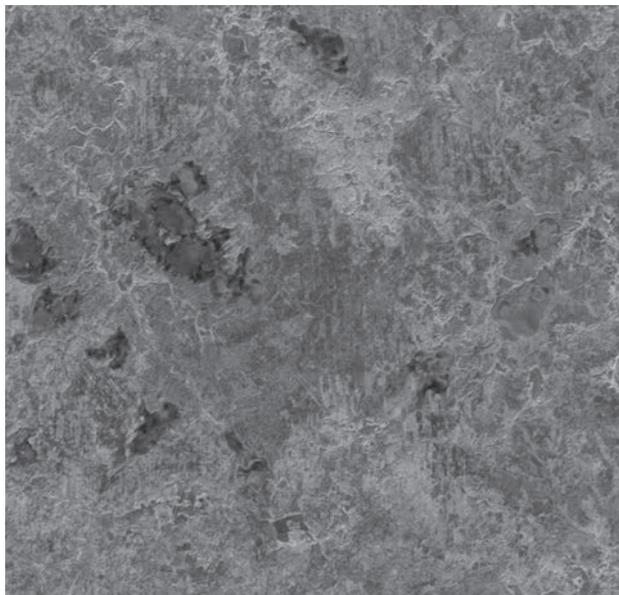


Рис. 4. Частный инвариант средних ИК каналов, Центрально-Лесной заповедник.

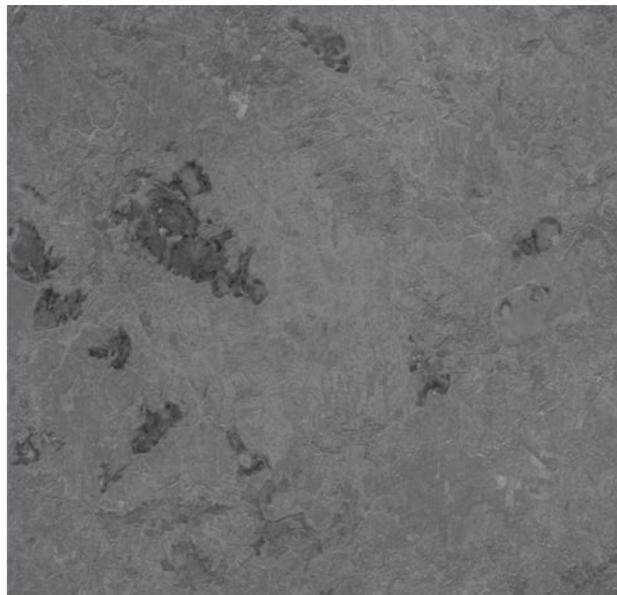


Рис. 5. Частный сезонный инвариант средних ИК каналов, Центрально-Лесной заповедник.

связан с летними, а также бесснежными сроками съемки, за исключением первой–второй декады апреля, и отрицательно со всеми остальными сроками съемки. Третий частный инвариант описывает 11% варьирования и имеет максимальные положительные связи со снимками первой–второй декады апреля, а также с 26 сентября 2020 г., с остальными сроками съемки значимых ФН нет. Четвертая компонента описывает 6% варьирования и имеет высокие положительные ФН с 3 июня 2007 г., 20 июня 2002 г. и низкий отрицательный ФН с 27 сентября 2000 г.

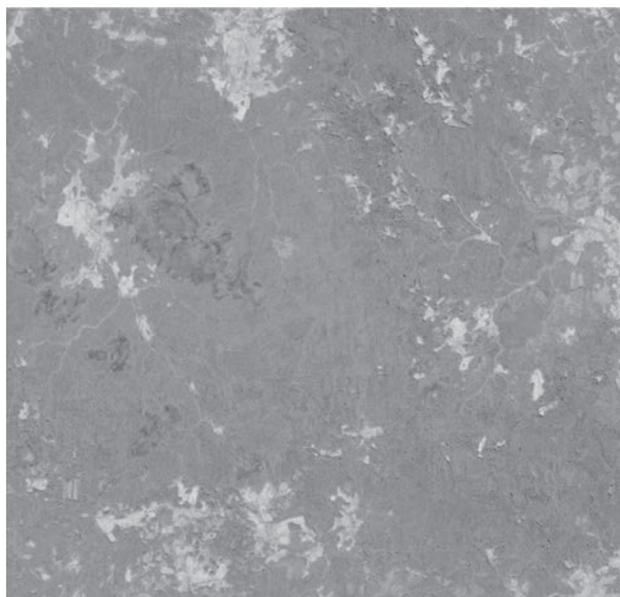
Согласно принятым критериям, для компонент КИК каналов выделяются частный инвариант положительно определяемый большинством компонент КИК каналов за все сроки съемки, кроме первой–второй декады апреля (рис. 4), и частный сезонный инвариант, высокими положительными значениями выделяющий слабо обводненные территории, в первую очередь летом при их относительно высоком обводнении в снежный период и наоборот, низкими отрицательными значениями сильно обводненные территории летом при их относительно низком обводнении зимой (рис. 5). Таким образом, уникальные условия первой–второй декады апреля, характеризующие начало вегетации при очень высоком влагосодержании большинства территорий в результате снеготаяния, лишь частично описываются частным сезонным инвариантом. Поэтому было решено оставить в анализе частный инвариант первой–второй декады апреля (рис. 6), как имеющий значительный вклад в описание общего варьирования и важное семантиче-

ское значение с точки зрения характеристики ландшафтного покрова в период весеннего снеготаяния, выделяя территории первыми лишаящиеся снежного покрова. В результате, три частных инварианта КИК каналов описывают 55% их исходного варьирования.

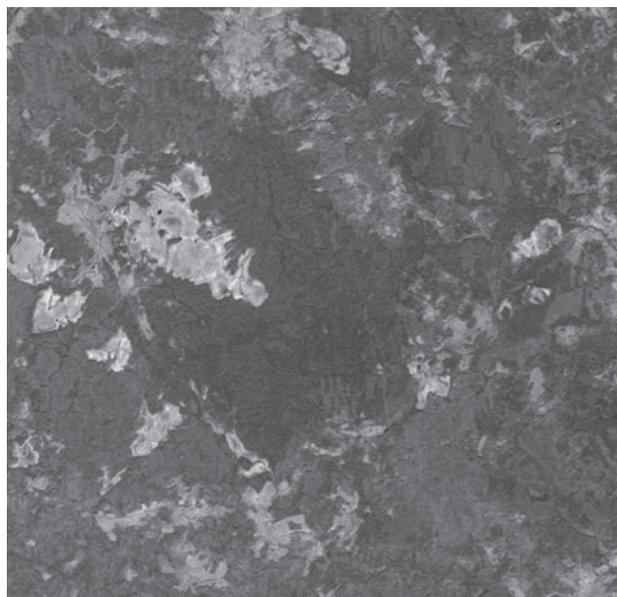
В результате интеграции компонент снимков выделено 6 частных инвариантов, описывающих общие закономерности отражения и его сезонного хода для всех рассматриваемых каналов и сроков съемки: 1) инвариант яркости всех каналов, 2) сезонный инвариант БИК канала, 3) инвариант БИК канала, 4) инвариант КИК каналов, 5) сезонный инвариант КИК каналов и 6) инвариант КИК каналов апреля.

Первый общий инвариант имеет максимальный положительный ФН с частными инвариантами общей яркости и БИК канала и отрицательный – с частным сезонным инвариантом КИК каналов, описывая 33% варьирования (табл. 5). Второй общий инвариант имеет максимальный положительный ФН с частным инвариантом КИК каналов и отрицательный – с частным сезонным инвариантом БИК канала, описывая 29% варьирования. Третий общий инвариант имеет максимальный положительный ФН с частным инвариантом КИК каналов первой–второй декады апреля, а также значимый отрицательный ФН с частными инвариантами ИК каналов, описывая 20% варьирования.

Таким образом, первый общий инвариант (рис. 7) высокими положительными значениями выделяет территории с высоким отражением, сильно обводненные летом, при их относительно



**Рис. 6.** Частный инвариант средних ИК каналов в первой–второй декадах апреля, Центрально-Лесной заповедник.



**Рис. 7.** Первый общий инвариант, Центрально-Лесной заповедник.

низком обводнении зимой, и высокой интенсивностью вегетации и напротив, низкими отрицательными значениями – территории с низким отражением слабо обводненные летом, при их относительно сильном обводнении зимой и низкой интенсивностью вегетации.

Второй общий инвариант (рис. 8) высокими положительными значениями выделяет слабо обводненные территории с высокой интенсивностью вегетации летом и низкой в начале апреля и наоборот, низкими отрицательными – сильно обводненные территории с низкой интенсивностью вегетации летом и высокой в начале апреля.

Третий общий инвариант (рис. 9) высокими положительными значениями выделяет территории, наименее обводненные в начале апреля с относительно низкой интенсивностью вегетации и относительно сильно обводненные в течение года и наоборот, низкими отрицательными значениями – наиболее обводненные в начале апреля с относительно высокой интенсивностью фотосинтеза и относительно низко обводненные в течение года.

В результате, три общих (интегральных) инварианта описывают 82% варьирования частных инвариантов общей яркости всех каналов съемки, БИК и КИК каналов и, таким образом, около половины исходного варьирования, всех каналов

**Таблица 5.** Результаты интеграции частных инвариантов

Частный инвариант	Факторные нагрузки частных инвариантов		
	первый общий инвариант	второй общий инвариант	третий общий инвариант
Общая яркость	<b>0.840645</b>	0.114280	0.329929
Сезонный ближнего ИК канала	0.246959	<b>-0.893927</b>	-0.085403
Ближнего ИК канала	<b>0.678433</b>	0.254471	-0.459837
Средних ИК каналов	0.011686	<b>0.836600</b>	-0.393373
Сезонный средних ИК каналов	<b>-0.779216</b>	0.218272	0.274220
Средних ИК каналов за первую–вторую декады апреля	0.336287	0.334112	<b>0.814722</b>
<b>Собственные значения</b>	1.948346	1.736094	1.221308
<b>Доля общей дисперсии</b>	0.324724	0.289349	0.203551

*Примечание.* Максимальные факторные нагрузки для каждого частного инварианта обозначены полужирным шрифтом.

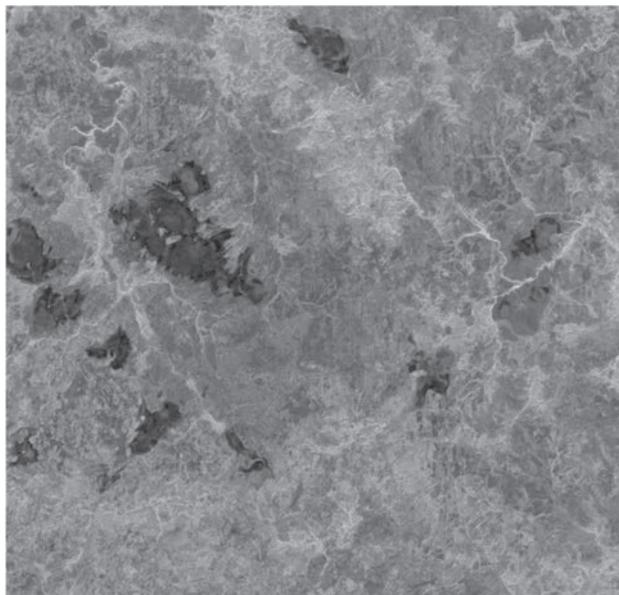


Рис. 8. Второй общий инвариант, Центрально-Лесной заповедник.

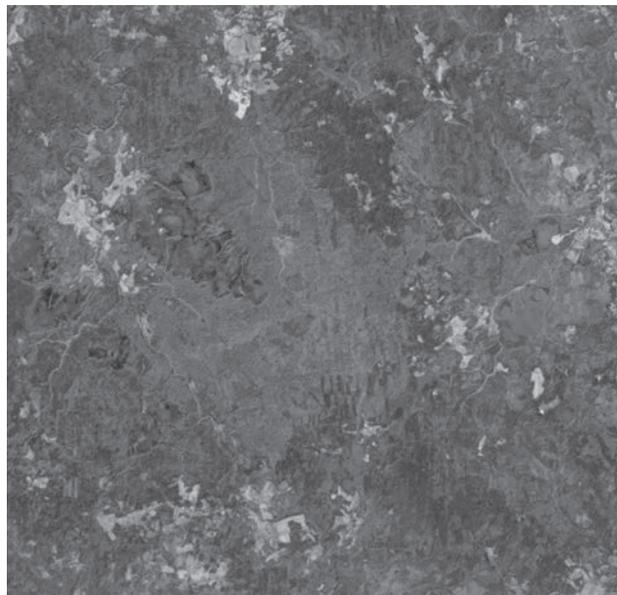


Рис. 9. Третий общий инвариант, Центрально-Лесной заповедник.

для всех сроков съемки (114 переменных), может быть представлено через три ортогональных интегральных переменных.

Для всей территории вклад характеристик рельефа в описание варьирования инвариантов низкий и только для второго инварианта он более значим с  $R^2$  равным 0.28 при ведущем вкладе уклонов рельефа, его кривизны для уровней 150–1300 м, а также его макроэкспозиций (табл. 6).

Мультирегрессионный анализ описаний растительности с общими инвариантами показал достаточно высокий уровень их связи при исправленном  $R^2$  – 0.4–0.5 для первых двух инвариантов и 0.26 для третьего. Основными, связанными с инвариантами, выступают характеристики древостоя в целом и таких пород, как ель, береза, ольха серая, клен, рябина, общие проективные покрытия трав и мхов, проективное покрытие видов травяно-кустарничкового яруса характерное для различных экотопов.

При совместном описании инвариантов от характеристик рельефа и описаний растительности уровень описания повышается, при этом наиболее значимые характеристики рельефа и описаний растительности входят и в совместную модель. Для первого инварианта  $R^2$  составляет 0.53 при положительной связи с суммой площадей сечения древостоя, проективным покрытием видов наземного яруса характерных для верховых болот, вторичных мелкоистовенных лесов, лугов и залежей, уклонами рельефа со средним линейными размерами 450 м и выпуклостью и различиями восточных и западных экспозиций с линейными

размерами около 1.3 км. Отрицательно первый инвариант определяется высотой древостоя, суммой площадей сечения ели, рябины и клена, проективным покрытием черники и подроста ели, а также минимальной кривизной рельефа с линейными размерами 150 м.

Второй инвариант определяется от состояния растительности и характеристик рельефа на уровне  $R^2$  – 0.63 и положительно связан с проективным покрытием влажнотравья, суммой площадей сечения липы, различиями в северных и южных экспозициях рельефа с линейными размерами 450 м и около 1 км, максимальной кривизной рельефа с линейными размерами 150 и 450 м, суммой площадей сечения древостоя, плановой выпуклостью рельефа с линейными размерами около 2.5 км и проективным покрытием ивы. Отрицательно второй инвариант определяется проективным покрытием мхов, и видов наземного яруса характерных для верховых болот, суммой площадей сечения ели и сосны, и кросс-секционной выпуклостью рельефа с линейными размерами около 1 км.

Третий инвариант наименее связан с состоянием растительности и характеристиками рельефа и при  $R^2$  – 0.37 положительно связан с суммой площадей сечения ели и клена, максимальной кривизной рельефа с линейными размерами около 4 км, проективным покрытием лютика едкого и хвоща лугового и минимальной кривизной рельефа с линейными размерами 150 м. Отрицательно третий инвариант определяется суммой площадей сечения березы, и древостоя в целом, проективным покрытием неморальных и болот-

**Таблица 6.** Интерпретация общих инвариантов от характеристик рельефа

Общий инвариант			
исправленный R <sup>2</sup> / ведущие переменные в анализе	Первый	Второй	Третий
Для характеристик рельефа всей территории (1546752 точек)	0.102813309/ Высота рельефа, уклон рельефа, минимальная кривизна, кросс-секционная выпуклость и освещенность с востока и юга с линейными размерами около 4 км, максимальная кривизна с линейными размерами 450 м, кросс-секционная выпуклость и минимальная кривизна с линейными размерами около 1 км, максимальная кривизна с линейными размерами около 2.5 км	0.279236132/ Уклон рельефа, уклон и освещенность с юга с линейными размерами около 2.5 км, минимальная кривизна с линейными размерами 150 м, максимальная кривизна с линейными размерами 270 м, минимальная кривизна и уклон с линейными размерами 450 м, кросс-секционная выпуклость и минимальная кривизна с линейными размерами около 1.3 км, плановая выпуклость и освещенность с юга с линейными размерами около 4 км и уклон с линейными размерами около 1 км	0.0734437692/ Высота рельефа, уклон, максимальная и минимальная кривизна и кросс-секционная выпуклость с линейными размерами около 1 км, максимальная кривизна с линейными размерами 450 м, оператор Лапласа, кросс-секционная выпуклость и уклон с линейными размерами около 4 км, освещенность с юга с линейными размерами около 2.5 км и освещенность с востока с линейными размерами около 1.3 км
Для характеристик растительности (1882 точки)	0.442272049/ Высота древостоя, сумма площадей сечения ели, <b>березы, ольхи серой и рябины, проективное покрытие подбела многолистного, клюквы болотной, лапчатки прямостоячей, черники обыкновенной, лютика едкого и кашубского, марьянника дубравного, подмаренника душистого, кочедыжника женского, кипрея узколистного, подроста ели, ивы и сосны, число видов подлеска, проективное покрытие трав</b>	0.497507036/ Проективное покрытие мхов и <b>трав, сумма площадей сечения ели и сосны, сумма площадей сечения и высота древостоя, проективное покрытие подбела многолистного, клюквы болотной, черники обыкновенной, луговика дернистого, яснотки зеленчуковой, лапчатки прямостоячей, крапивы двудомной, бора развесистого, лютика кашубского и едкого, марьянника дубравного, звездчатки ланцетной, золотарника обыкновенного, смородины, подроста ивы, вяза, ели</b>	0.26202277/ <b>Сумма площадей сечения ели, клена, сумма площадей сечения и высота древостоя, проективное покрытие подмаренника душистого, крапивы двудомной, лютика едкого, клюквы болотной, копытня европейского, недотроги обыкновенной, сердечника, бора развесистого, щитовника букового, подроста ели, проективное покрытие мхов</b>

Таблица 6. Окончание

Общий инвариант	Первый	Второй	Третий
исправленный R <sup>2</sup> / ведущие переменные в анализе			
Для характеристик рельефа и растительности совместно (1882 точки)	0.525320825/ Высота и <b>сумма площадей сечения древостоя</b> , сумма площадей сечения ели, рябины, клена, проективное покрытие <b>подбела многолистного, клюквы болотной, лютика едкого, марьяника дубравного</b> , черники обыкновенной, подроста ели, <b>уклон с линейными размерами 450 м</b> , минимальная кривизна с линейными размерами 150 м, <b>кросс-секционная выпуклость и освещенность с востока с линейными размерами около 1.3 км</b>	0.626886327/ Проективное покрытие мхов, проективное покрытие клюквы болотной, подбела многолистного, <b>крапивы двудомной, луговика дернистого, лапчатки прямостоячей</b> , сумма площадей сечения ели, <b>липы, сосны, освещенность с юга</b> и кросс-секционная выпуклость с линейными размерами около 1 км, <b>максимальная кривизна с линейными размерами 150 м, сумма площадей сечения древостоя, плановая выпуклость с линейными размерами около 2.5 км, освещенность с юга и максимальная кривизна с линейными размерами 450 м, проективное покрытие подроста ивы</b>	0.372848784/ Сумма площадей сечения березы, <b>ели, клена</b> и древостоя, <b>максимальная кривизна с линейными размерами около 4 км</b> , проективное покрытие крапивы двудомной, клюквы болотной, <b>лютика едкого</b> , копытня европейского, ожики волосистой, <b>хвоша лугового, минимальная кривизна с линейными размерами 150 м</b> , минимальная кривизна и освещенность с юга с линейными размерами 270 м

ных видов наземного покрова, минимальной кривизной рельефа и различиями южных и северных экспозиций с линейными размерами 270 м.

**Обсуждение.** В отечественной школе ландшафтоведения на протяжении длительного периода времени понятие инвариант имело статическую трактовку, под ним понималась некая вертикальная или горизонтальная структура ландшафта, обусловленная геоморфологической основой. По мере развития представлений о ландшафте как о сложной динамической системе и накопления мультиспектральной дистанционной информации, понятие “инвариант” стало возможным отождествить с параметром порядка системы, имеющим вполне определенный физический смысл.

В (Пузаченко и др., 2019) показано, что инварианты динамической системы тождественны параметрам порядка в синергетике, а основной метод для их расчета — метод главных компонент. Его использование относительно исходных каналов Landsat позволяет выделить несколько компонентов снимков, отражающих основные характеристики ландшафтного покрова: общую яркость, характеризующую надземную фитомассу, яркость в БИК канале, характеризующую интенсивность фотосинтеза, яркость в КИК каналах, характеризующую содержание свободной воды, и тепловой поток, при включении в анализ дальних ИК каналов.

В условиях южно-таежного ландшафта, в рамках данных МДДЗ, можно выделить два принципиально отличных периода по наличию БИК компоненты снимков: с наличием снежного покрова (февраль—март) и бесснежный (апрель—сентябрь). Также выделяется летний период (июнь), характеризующейся большей долей БИК канала относительно КИК каналов и вторая декада апреля, с большей долей КИК каналов относительно БИК канала. Для сентября характерен паритет ИК каналов. В целом выделяемые компоненты снимков описывают исходное варьирование каналов съемки минимум на 94%, таким образом, практически полностью сохраняя всю исходную информацию по каждому сроку съемки.

Обобщение компонент снимков за все сроки съемки выделяет один частный инвариант для общей яркости всех каналов съемки, что идентифицирует постоянство в отражении общей фитомассы в течении всего года, другими словами, территории с наибольшим отражением и, соответственно, с минимальной фитомассой остаются таковыми и в снежный и в бесснежный периоды, то же относится и к территориям с наименьшим отражением и наибольшей фитомассой. Таким образом, частный инвариант общей яркости описывает почти 70% варьирования общей яркости за все сроки съемки.

Обобщение компонент БИК канала, отражающего фотосинтетическую активность растительности, за все сроки съемки выделяет частные сезонный и общий инварианты, при этом сезонный имеет почти в 2 раза больший вес, чем общий. Сезонный инвариант противопоставляет активность вегетации для территорий с максимальной вегетацией в весенне-осенний период и летом. Общий инвариант БИК компонент определяет дифференциацию территории по активности фотосинтеза в течение всего вегетационного периода, особенно в период ее максимума. Таким образом, совместно, инварианты БИК канала описывают более 60% исходного варьирования компонент БИК канала снимков.

Наиболее сложная структура частных инвариантов наблюдается для КИК компоненты снимков, отражающей общее содержание свободной влаги в ландшафтном покрове. Выделяются частный инвариант, описывающий все сроки съемки, кроме первой–второй декады апреля, отражающий общее содержание влаги в течении большей части года для большей части территории, частный сезонный инвариант, выделяющий слабо обводненные территории с конца апреля по сентябрь, особенно в июне, при их сильном обводнении в весенний период и частный инвариант, описывающий содержание влаги в основном в первую–вторую декаду апреля, как особое состояние обводнения территории в период половодья. В результате, совместно частные инварианты КИК компоненты описывают около 55% варьирования компоненты КИК каналов за все сроки съемки.

Несмотря на то, что главные компоненты яркости и ИК каналов для каждого снимка являются ортогональными и, соответственно, взаимонезависимыми, результаты их обобщения по срокам съемки уже таковыми не являются. Выделяется *три общих инварианта*, при этом *первый* обобщает частный инвариант компонент общей яркости каналов, частный сезонный инвариант компонент КИК каналов и частный инвариант компонент БИК канала, таким образом отражая общую фитомассу, территории контрастные по содержанию влаги весной и летом и общую активность фотосинтеза. *Второй общий инвариант* определяется частными сезонным инвариантом компонент БИК канала и инвариантом компонент КИК каналов, выделяя территории с различными сроками наиболее активного фотосинтеза и общее содержание свободной воды территории. *Третий общий инвариант* в наибольшей степени определяется частным инвариантом компонент КИК каналов в первой–второй декаде апреля и, в меньшей степени, частным инвариантом компонент БИК канала, выделяя территории контрастные по влагосодержанию в период половодья и общую активность фотосинтеза. Совместно общие инварианты опи-

сывают около 70% варьирования инвариантов компонент снимков.

Следует отметить, что семантически близкие результаты были получены нами при выделении параметров порядка термодинамической системы ландшафта заповедника (Sandlersky and Krenke, 2020). При анализе термодинамических переменных, рассчитанных по более короткой серии съемки Landsat (1986–2009) получено три инварианта, первый из которых характеризует общее поглощение солнечной энергии в течение всего года, второй – продуктивность в течение всего вегетационного периода, а третий – продуктивность весной и осенью.

Таким образом, прослеживая семантику исходных каналов съемки в ходе их обобщения, можно определить основные различия квазистационарных состояний территории, выделяемых частными и общими инвариантами. Детализация семантической интерпретации на основе полевых геоботанических данных и характеристик рельефа позволяет конкретизировать состояния территории, определяемые общими инвариантами. Морфометрические характеристики рельефа слабо определяют варьирование общих инвариантов, из чего следует значительная независимость растительного покрова, формирующего отражение, от рельефа для большей части территории. Это подтверждается при мультирегрессионном анализе инвариантов от морфометрических характеристик рельефа и характеристик геоботанических описаний совместно, в котором ведущий вклад в модель получают характеристики растительности. В результате показано, что *первый общий инвариант*, в наибольшей степени отражающий надземную фитомассу, выделяет высокими значениями территории с низкой фитомассой, такие как верховые болотные массивы, молодые мелколиственные леса, луга и залежи. При этом для территорий с низкой фитомассой наблюдается высокая активность фотосинтеза, что характерно для лугов, залежей и молодых мелколиственных лесов и высокое влагосодержание летом, характерное для верховых болот. Низкими значениями первого общего инварианта выделяются территории с высокой фитомассой, относительно низкой интенсивностью фотосинтеза и высоким влагосодержанием весной, представляющие собой леса с преобладанием ели, особенно бореальные еловые лесами с большими запасами древостоя.

*Второй общий инвариант* наибольшими значениями выделяет территории с высокой интенсивностью фотосинтеза в летний период при их невысоком влагосодержании в течении всего года, таким образом выделяя луга и залежи, молодые и средневозрастные неморальные широколиственно-мелколиственные и мелколиственные леса, травяно-кустарниковые сообщества пойм рек. Низ-

кими значениями выделяются территории с относительно невысокой интенсивностью фотосинтеза летом при высоком влагосодержании в течение всего года, такие как верховые болотные массивы, в том числе с сосновым редколесьем, и бореальные леса с преобладанием ели.

*Третий общий инвариант*, наибольшими значениями выделяющий территории с низким влагосодержанием в период половодья и низкой интенсивностью фотосинтеза, в первую очередь выделяет луга и залежи, зарастающие вырубками, а также еловые леса. Низкими значениями выделяются территории с высоким влагосодержанием в период половодья и высокой интенсивностью фотосинтеза — верховые болота, молодые неморальные широколиственные-мелколиственные и мелколиственные леса.

Таким образом, можно констатировать, что система отражения мультиспектральных данных от деятельной поверхности земли, для исследуемой территории за последние 35 лет, определяется тремя независимыми координатами в рамках которых выделяются несколько устойчивых во времени основных аттракторов: леса с преобладанием ели, молодые и средневозрастные леса с преобладанием мелколиственных пород, верховые болота, луга и залежи. Предложенная схема анализа позволяет оценивать положение каждого состояния съемки в этой системе координат.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал возможность последовательного снижения пространства признаков многолетних серий МДДЗ на основе метода главных компонент с выделением, в конечном итоге, ограниченного числа независимых компонент, отражающих около половины исходного варьирования каналов съемки для всех сроков измерений, как инвариантов или параметров порядка сложной динамической системы, определяющих пространственно-временную динамику ее отражения. Показано, что на основе общих представлений о физическом смысле отражательных характеристиках для разных диапазонов электромагнитного спектра, возможна семантическая интерпретация инвариантов с определением основных свойств выделяемых ими территорий. Более детальная информация о семантическом содержании инвариантов может быть получена с использованием морфометрических характеристик рельефа и полевых данных. Показано, что инварианты отражают основные особенности растительного покрова исследуемой территории при их относительно низкой обусловленностью морфометрическими характеристиками рельефа.

Таким образом, выделенные инварианты, в первую очередь, отражают относительно стационарные состояния растительного покрова, что позволяет рассматривать отклонения от них новых данных как проявление обратимых и необратимых динамических процессов. С другой стороны, на основе инвариантов возможна сегментация территории с выделением типичных в пространстве и времени состояний, что может иметь широкое практическое применение как в лесном, так, особенно, и в сельском хозяйстве на фоне высокой внутри и межгодовой изменчивости отражательных характеристик деятельной поверхности земли, свойственной для агроландшафтов. Также инварианты могут быть использованы в решении задач, связанных с оценкой состояния окружающей среды, экологическим мониторингом и экосистемными услугами. Так, устойчивые отношения переменных за определенный временной интервал могут рассматриваться как “отправная точка” или эталон.

Количественное выявление факторов, влияющих на структуру отражения территории, в частности растительности, на фоне инвариантных отношений, является основой для расчетов последствий при различной хозяйственной деятельности. Например, данные расчеты для инвариантов температурных полей (Пузаченко и др., 2019) имеют принципиально важное значение, так как показано, что вырубки крупных площадей повышают температуру окружающего воздуха сопоставимо с глобальным потеплением, что приводит к повышению уровня пожарной опасности для окружающих территорий.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по теме № FMGE-2019-0007 Государственного задания Института географии РАН (в части сбора данных) и гранта РНФ № 22-27-00781 (в части анализа данных).

## FUNDING

The work was financially supported by state task FMGE-2019-0007 (data collection) and Russian Science Foundation, project no. 22-27-00781 (data analysis).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бевз В.Н.* Инвариантный аспект пространственно-временной организации склоновых ландшафтов // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. география и геоэкология. 2002. № 1. С. 48–52.
- Большаков А.Г.* Основы теории градостроительства и районной планировки. Иркутск: Изд-во Иркутск. гос. техн. ун-та, 2004. 216 с.
- Бородин О.И., Бугай А.С., Гихман И.И.* Биографический словарь деятелей в области математики. Киев: Рад. школа, 1979. 607 с.

- Васильев И.С. и др.* Устойчивость криогенных ландшафтов на северном участке трассы железной дороги Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2009. № 2. С. 4–8.
- Коберниченко В.Г., Тренихин В.А.* Методы синтеза изображений на основе данных дистанционного зондирования Земли различного разрешения // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 4. С. 22–31.
- Крауклис А.А.* Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 282 с.
- Кренке А.Н., Пузаченко Ю.Г., Пузаченко М.Ю.* Пространственная организация регионального мезоклимата // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 3. С. 116–130.
- Макунина Г.С.* Геофизические системы ландшафтов // География и природные ресурсы. 2011. № 4. С. 5–11.
- Мильков Ф.Н.* Физическая география: учение о ландшафте и географическая зональность. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1986. 326 с.
- Петрищев В.П. и др.* Особенности формирования ландшафтов Индерского солянокупольного района (Прикаспийская впадина) // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 79–84.
- Преображенский В.С., Александрова Т.Д.* Первичный анализ терминов динамики ландшафтов // Изв. ВГО. 1975. Т. 107. № 5. С. 397–404.
- Пузаченко Ю.Г.* Инвариантность геосистем и их компонентов / Устойчивость геосистем. М.: Наука, 1983. С. 32–41.
- Пузаченко Ю.Г.* Инварианты динамической геосистемы // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 5. С. 6–16.
- Пузаченко Ю.Г., Байбар А.С., Варлагин А.В., Кренке А.Н., Сандлерский Р.Б.* Тепловое поле южно-таежного ландшафта Русской равнины // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 2. С. 51–68.
- Пузаченко Ю.Г., Онуфрениа И.А., Алещенко Г.М.* Спектральный анализ иерархической организации рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 4. С. 29–38.
- Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.П.* Независимость внутри целого и в биотической части геосистемы / Системный подход в географии. Тез. докл. М., 1972. С. 22–23.
- Сандлерский Р.Б.* Выявление инварианта энергетического поля ландшафта на основе дистанционной спектральной информации. [http://www.landscape.edu.ru/files/sand\\_lomonos\\_2007.pdf](http://www.landscape.edu.ru/files/sand_lomonos_2007.pdf) (дата обращения 25.03.2019).
- Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г.* Энергетические характеристики геосистем Центрально-Лесного заповедника по данным дистанционного зондирования // Тр. Центрально-Лесного гос. природ. биосф. зап. 2007. № 5. С. 429–440.
- Скулкин В.С.* Эмпирическая мелкомасштабная модель растительности СССР: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Институт географии АН СССР, 1979. 24 с.
- Сочава В.Б.* Вопросы классификации растительности, типологии физико-географических фаций и биогеоценозов // Вопросы классификации растительности. Свердловск: Уральский филиал АН СССР, 1961. С. 5–22.
- Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
- Хакен Г.* Принципы работы голоногого мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: Изд-во Пер СЕ, 2001. 351 с.
- Хакен Г.* Синергетика. М.: Изд-во МИР, 1980. 405 с.
- Черных Д.В.* О границах ландшафта: неортодоксальный взгляд физико-географа // Международ. журн. исследований культуры. 2015. № 4 (21). С. 63–72.
- Самонастраивающиеся системы: справочник / ред. П.И. Чинаев.* Киев: Наукова думка, 1969. 528 с.
- Allen T.F.H., Starr T.B.* Hierarchy: perspectives for ecological complexity. Chicago: Chicago Univ. Press, 1982. 310 p.
- Campbell M.J., Congalton R.G.* Landsat-based land cover change analysis in Northeastern Oregon's timber resource dependent communities // American Society of Photogrammetry and Remote Sensing 2012 Annual Conference. 2012. P. 19–23.
- Cao W., Li B., Zhang Y.* A remote sensing image fusion method based on PCA transform and wavelet packet transform / Int. Conference on Neural Networks and Signal Processing. 2003. Vol. 2. P. 976–981.
- Chang H., Yoon W.S.* Improving the classification of Landsat data using standardized principal components analysis // KSCE J. Civil Engineering. 2003. № 7 (4). P. 469–474.
- Choi M.* A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. Vol. 44. P. 1672–1682.
- Forman R.T.* Land mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995. 217 p.
- Forman R.T., Godron M.* Landscape Ecology. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1986. 620 p.
- Gobattoni F., Lauro G., Monaco R., Pelorosso R.* Mathematical models in landscape ecology: stability analysis and numerical tests // Acta Applicandae Mathematicae. 2013. № 125 (1). P. 173–192.
- Griffiths P., van der Linden S., Kuemmerle T., Hostert P.* A pixel-based Landsat compositing algorithm for large area land cover mapping // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sens. 2013. Vol. 6 (5). P. 2088–2101.
- Holben B.N.* Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data // Int. J. Remote Sens. 1986. Vol. 7 (11). P. 1417–1434.
- Ingebritsen S.E., Lyon R.J.P.* Principal components analysis of multitemporal image pairs // Int. J. Remote Sens. 1985. Vol. 6 (5). P. 687–696.
- Kwarteng P., Chavez A.* Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1989. Vol. 55 (1). P. 339–348.
- Luo Y., Trishchenko A.P., Khlopenkov K.V.* Developing clear-sky, cloud and cloud shadow mask for producing clear-sky composites at 250-meter spatial resolution for the seven MODIS land bands over Canada and North America // Remote Sens. of Environ. 2008. Vol. 112 (12). P. 4167–4185.

- Metwalli M.R., Nasr A.H., Allah O.S.F., El-Rabaie S., Abd El-Samie F.E. Satellite image fusion based on principal component analysis and high-pass filtering // *J. Opt. Soc. Am. A*. 2010. Vol. 27. P. 1385–1394.
- Naidu V.P.S., Raol J.R. Pixel-level image fusion using wavelets and principal component analysis // *Def. Sci. J.* 2008. Vol. 58. P. 338–352.
- Nunez J., Otazu X., Fors O., Prades A., Pala V., Arbiol R. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999. Vol. 37. P. 1204–1211.
- O'Neill R.V., Deangelis D.L., Waide J.B., Allen T.F., Allen G.E. A hierarchical concept of ecosystems. Princeton: Princeton Univ. Press, 1986. № 23. 254 p.
- O'Neill R.V., Milne B.T., Turner M.G., Gardner R.H. Resource utilization scales and landscape pattern // *Landscape Ecol.* 1988. Vol. 2 (1). P. 63–69.
- Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia // *Remote Sens. of Environ.* 2011. Vol. 115 (2). P. 548–561.
- Riasati V.R., Zhou H. Reduced data projection slice image fusion using principal component analysis // *Proc. SPIE*. 2005. Vol. 5813. P. 1–15.
- Roy D.P., Ju J., Kline K., Scaramuzza P.L., Kovalsky V., Hansen M., Loveland T.R., Vermote E., Zhang C. Web-enabled Landsat Data (WELD): Landsat ETM+ composited mosaics of the conterminous United States // *Remote Sens. of Environ.* 2010. Vol. 114 (1). P. 35–49.
- Sandlersky R., Krenke A. Solar energy transformation strategies by ecosystems of the boreal zone (thermodynamic analysis based on remote sensing data) // *Entropy*. 2020. Vol. 22. № 10. P. 1132–1140.
- Shahdoosti H.R., Ghassemian H. Spatial PCA as a new method for image fusion // *The 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP 2012)*. 2012. P. 90–94.
- Tu T.-M., Su S.-C., Shyu H.-C., Huang P.S. A new look at IHS-like image fusion methods // *Information Fusion*. 2001a. Vol. 2 (3). P. 177–186.
- Tu T.-M., Su S.-C., Shyu H.-C., Huang P.S. Efficient intensity-hue-saturation-based image fusion with saturation compensation // *Opt. Eng.* 2001b. Vol. 40. P. 720–728.
- Turner M.G. Landscape ecology: the effect of pattern on process // *Annual Rev. Ecol. Evol. Syst.* 1989. Vol. 20 (1). P. 171–197.
- Turner M.G. Landscape ecology: what is the state of the science? // *Annual Rev. Ecol. Evol. Syst.* 2005. Vol. 36. P. 319–344.
- Turner M.G., Gardner R.H., O'Neill R.V. Landscape ecology in theory and practice. NY: Springer, 2001. 499 p.
- White J.C., Wulder M.A. The Landsat observation record of Canada: 1972–2012 // *Canadian J. of Remote Sens.* 2014. Vol. 39 (6). P. 455–467.
- Wu J.G. Scale and scaling: a cross-disciplinary perspective. In: Key topics in landscape ecology / J.G. Wu, R. Hobbs (Eds). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006. P. 115–142.
- Wu J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations // *Landscape Ecology*. 2004. Vol. 19 (2). P. 125–138.
- Zhu Z., Woodcock C.E., Holden C., Yang Z. Generating synthetic Landsat images based on all available Landsat data: Predicting Landsat surface reflectance at any given time // *Remote Sens. of Environ.* 2015. Vol. 162. P. 67–83.

## Landscape Invariants—Order Parameters of a Dynamic System

A. S. Baibar<sup>1, 2, 3, \*</sup>, M. Yu. Puzachenko<sup>1</sup>, R. B. Sandlersky<sup>2, 3</sup>, and A. N. Krenke<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*HSE University, Moscow, Russia*

\*e-mail: baybaranastasia@yandex.ru

The article considers theoretical and methodological substantiation of identifying invariants problem in non-linear dynamic systems. Invariance in context of stable spatio-temporal structures in a landscape was proposed by V.B. Sochava in 1961. The accumulation of long-term series of landscape observations by means of multispectral imaging made it possible to identify invariants in practice. An analysis of Landsat multispectral measurements from 1987 to 2022 for the southern taiga landscape (Central Forest State Nature Biosphere Reserve) shows that invariants identified as order parameters primarily determine total aboveground vegetation biomass, the water content in vegetation and soils, and the intensity of photosynthesis, i.e. bioproduction process. The proposed scheme for analyzing time series of remote sensing data makes it possible to assess landscape cover at the time of survey with respect to invariants and to identify the main control parameters that determine changes in environmental conditions and self-development of geosystems. The assessment of vegetation and relief contribution to formation of invariants structure was made to reveal invariants physical meaning. The results showed that relief has little effect on order parameters, and vegetation cover make the greatest contribution to invariant structure formation. Since invariants make it possible to identify the most stationary states, they can be used to solve applied problems in agriculture and forestry, as well as in the assessment of various ecosystem services.

**Keywords:** multispectral remote sensing data, order parameters, invariant, synergetics, Landsat, Central Forest State Nature Biosphere Reserve, Principal Component Method, geobotanical descriptions, morphometric characteristics of relief, southern taiga landscape, south of the Valdai Upland

## REFERENCES

- Allen T.F.H., Starr T.B. Hierarchy: perspectives for ecological complexity. Chicago: The University of Chicago Press, 1982. 310 p.
- Bezv V.N. The invariant aspect of the spatio-temporal organization of slope landscapes, *Vestn. Voronezh. Univ. Ser. Geogr. i Geoekol.*, 2002, no. 1, pp. 48–52. (In Russ.).
- Bolshakov A.G. *Osnovy teorii gradostroitel'stva i raionnoi planirovki* [Fundamentals of the Theory of Urban Planning and District Planning]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2004. 216 p.
- Borodin O.I., Bugai A.S., Gikhman I.I. *Biograficheskii slovar' deyatelei v oblasti matematiki* [Biographical Dictionary of Actors in Mathematics]. Kyiv: Rad. Shkola, 1979. 607 p.
- Campbell M.J., Congalton R.G. Landsat-based land cover change analysis in Northeastern Oregon's timber resource dependent communities. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing 2012 Annual Conference, 2012, pp. 19–23.
- Cao W., Li B., Zhang Y. A remote sensing image fusion method based on PCA transform and wavelet packet transform. In *International Conference on Neural Networks and Signal Processing*, 2003, vol. 2, pp. 976–981.
- Chang H., Yoon W.S. Improving the classification of Landsat data using standardized principal components analysis. *KSCE J. Civ. Eng.*, 2003, vol. 7, no. 4, pp. 469–474.
- Chernykh D.V. On the boundaries of the landscape: an unorthodox view of a physical geographer. *Mezhdunar. Zh. Issled. Kultury*, 2015, vol. 4, no. 21, pp. 63–72. (In Russ.).
- Samonastravayushchiesya sistemy: spravochnik* [Self-adjusting Systems: A Reference Book]. Chinaev P.I., Ed. Kyiv: Naukova Dumka, 1969. 528 p.
- Choi M. A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, no. 44, pp. 1672–1682.
- Forman R.T. Land mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge Univ. Press, 1995. 217 p.
- Forman R.T., Godron M. Landscape Ecology. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1986. 620 p.
- Griffiths P., van der Linden S., Kuemmerle T., Hostert P. A pixel-based Landsat compositing algorithm for large area land cover mapping. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 2013, vol. 6, no. 5, pp. 2088–2101.
- Gobattoni F., Lauro G., Monaco R., Pelorosso R. Mathematical models in landscape ecology: stability analysis and numerical tests. *Acta Appl. Math.*, 2013, vol. 125, no. 1, pp. 173–192.
- Haken G. *Printsipy raboty golonogogo mozga: Sinergeticheskii podkhod k aktivnosti mozga, povedeniyu i kognitivnoi deyatel'nosti* [Principles of the Bare-Legged Brain: A Synergistic Approach to Brain Activity, Behavior and Cognitive Activity]. Moscow: PER CE Publ., 2001. 351 p.
- Haken G. *Sinergetika* [Synergetics]. Moscow: PER CE Publ., 1980. 405 p.
- Holben B.N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, 1986, vol. 7, no. 11, pp. 1417–1434.
- Ingebritsen S. E., Lyon R. J.P. Principal components analysis of multitemporal image pairs. *Int. J. Remote Sens.*, 1985, vol. 6, no. 5, pp. 687–696.
- Kobrnichenko V.G., Trenikhin V.A. Methods for the synthesis of images based on remote sensing data of the Earth of various resolutions. *Usp. Sovrem. Radioelektroniki*, 2007, no. 4, pp. 22–31. (In Russ.).
- Krauklis A.A. *Problemy eksperimental'nogo landshaftovedeniya* [Problems of Experimental Landscape Science]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979. 282 p.
- Krenke A.N., Puzachenko Yu.G., Puzachenko M.Yu. Spatial Organization of Regional Mesoclimate. *Izv. Ross. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2019, no. 3, pp. 116–130. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S2587-556620193116-130>
- Kwarteng P., Chavez A. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 1989, vol. 55, no. 1, pp. 339–348.
- Luo Y., Trishchenko A.P., Khlopenkov K.V. Developing clear-sky, cloud and cloud shadow mask for producing clear-sky composites at 250-meter spatial resolution for the seven MODIS land bands over Canada and North America. *Remote Sens. Environ.*, 2008, vol. 112 (12), pp. 4167–4185.
- Makunina G.S. Geophysical systems of landscapes. *Geogr. Nat. Resour.*, 2011, no. 32, pp. 301–307.
- Metwalli M.R., Nasr A.H., Allah O.S.F., El-Rabaie S., Abd El-Samie F.E. Satellite image fusion based on principal component analysis and high-pass filtering. *J. Opt. Soc. Am.*, 2010, no. 27, pp. 1385–1394.
- Milkov F.N. *Fizicheskaya geografiya: uchenie o landshafte i geograficheskaya zonal'nost'* [Physical Geography: Landscape Studies and Geographic Zoning]. Voronezh: Voronezh. Univ. Publ., 1986. 326 p.
- Naidu V.P.S., Raol J.R. Pixel-level image fusion using wavelets and principal component analysis. *Def. Sci. J.*, 2008, no. 58, pp. 338–352.
- Nunez J., Otazu X., Fors O., Prades A., Pala V., Arbiol R. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1999, no. 37, pp. 1204–1211.
- O'Neill R.V., Deangelis D.L., Waide J.B., Allen T.F., Allen G.E. A hierarchical concept of ecosystems. Princeton University Press, 1986, no. 23. 254 p.
- O'Neill R.V., Milne B.T., Turner M.G., Gardner R.H. Resource utilization scales and landscape pattern. *Landscape Ecol.*, 1988, vol. 2, no. 1, pp. 63–69.
- Petrishchev V.P. et al. The formation features of landscapes in the Inderskii salt-dome area (Precaspian Hollow). *Geogr. Nat. Resour.*, 2011, no. 32, pp. 146–151.
- Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia. *Remote Sens. Environ.*, 2011, vol. 115, no. 2, pp. 548–561.
- Preobrazhensky V.S., Aleksandrova T.D. Primary analysis of the terms of landscape dynamics. *Izv. VGO*, 1975, vol. 107, no. 5, pp. 397–404. (In Russ.).
- Puzachenko Yu.G. Invariance of geosystems and their components. In *Ustoichivost' geosistem* [Stability of Geosystems]. Moscow: Nauka Publ., 1983, pp. 32–41. (In Russ.).

- Puzachenko Yu.G. Invariants of the dynamic geosystems. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2010, no. 5, pp. 6–16. (In Russ.).
- Puzachenko Yu.G., Baibar A.S., Varlagin A.V., Krenke A.N., Sandler'sky R.B. Thermal field of the southern taiga landscape of the Russian Hidden. *Izv. Akad. Nauk. Geogr. Ser.*, 2019, no. 2, pp. 51–68. (In Russ.).
- Puzachenko Yu.G., Onufrenya I.A., Aleshchenko G.M. Spectral analysis of the hierarchical organization of the relief. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2002, no. 4, pp. 29–38. (In Russ.).
- Puzachenko Yu. G., Skulkin V.P. Independence within the whole and in the biotic part of the geosystem. System approach in geography. *Tezisy Dokl.*, M., 1972, pp. 22–23. (In Russ.).
- Riasati V.R., Zhou H. Reduced data projection slice image fusion using principal component analysis. *Proc. SPIE*, 2005, no. 5813, pp. 1–15.
- Roy D.P., Ju J., Kline K., Scaramuzza P.L., Kovalsky V., Hansen M., Loveland T.R., Vermote E., Zhang C. Web-enabled Landsat Data (WELD): Landsat ETM+ composited mosaics of the conterminous United States. *Remote Sens. Environ.*, 2010, vol. 114, no. 1, pp. 35–49.
- Sandler'sky R.B. Revealing the invariant of the energy field of the landscape based on remote spectrozonal information. Available at: [http://www.landscape.edu.ru/files/sand\\_lomonos\\_2007.pdf](http://www.landscape.edu.ru/files/sand_lomonos_2007.pdf) (accessed 03.25.2019)
- Sandler'sky R., Krenke A. Solar energy transformation strategies by ecosystems of the boreal zone (thermodynamic analysis based on remote sensing data). *Entropy*, 2020, vol. 22, no. 10, pp. 1132–1140.
- Sandler'sky R.B., Puzachenko Yu.G. Energy characteristics of the geosystems of the Central Forest Reserve according to remote sensing data. *Proceedings of the Central Forest State Natural Biosphere Reserve*, 2007, no. 5, pp. 429–440. (In Russ.).
- Shahdoosti H.R., Ghassemian H. Spatial PCA as a new method for image fusion. In The 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP 2012), 2012, pp. 90–94.
- Skulkin V.S. Empirical small-scale model of vegetation of the USSR. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geography) Dissertation*. Inst. Geogr. Akad. Nauk SSSR, 1979. 24 p.
- Sochava V.B. Questions of classification of vegetation, typology of physical-geographical facies and biogeocenoses. In *Voprosy klassifikatsii rastitel'nosti* [Issues of Vegetation Classification]. Sverdlovsk: Ural Branch of the Academy of Sciences of the USSR, 1961, pp. 5–22. (In Russ.).
- Sochava V.B. *Vvedenie v uchenie o geosistemakh* [Introduction to the Theory of Geosystems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978. 319 p.
- Tu T.-M., Su S.-C., Shyu H.-C., Huang P.S. A new look at IHS-like image fusion methods. *Information Fusion*, 2001a, vol. 2, no. 3, pp. 177–186.
- Tu T.-M., Su S.-C., Shyu H.-C., Huang P.S. Efficient intensity-hue-saturation-based image fusion with saturation compensation. *Opt. Eng.*, 2001b, no. 40, pp. 720–728.
- Turner M.G. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1989, vol. 20(1), pp. 171–197.
- Turner M.G. Landscape ecology: what is the state of the science? *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 2005, vol. 36, pp. 319–344.
- Turner M.G., Gardner R.H., O'Neill R.V. *Landscape ecology in theory and practice*. New York: Springer, 2001, vol. 401. 499 p.
- Vasiliev I.S. et al. Stability of cryogenic landscapes on the northern section of the Yakutia railway line. *Prir. Resur. Arktiki i Subarkтики*, 2009, no. 2, pp. 4–8. (In Russ.).
- White J.C., Wulder M.A. The Landsat observation record of Canada: 1972–2012. *Canadian J. Remote Sens.*, 2014, vol. 39, no. 6, pp. 455–467.
- Wu J.G. Scale and scaling: a cross-disciplinary perspective. In *Key topics in landscape ecology*. Wu J.G., Hobbs R., Eds. Cambridge University Press, Cambridge, 2006, pp. 115–142.
- Wu J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landsc. Ecol.*, 2004, vol. 19, no. 2, pp. 125–138.
- Zhu Z., Woodcock C.E., Holden C., Yang Z. Generating synthetic Landsat images based on all available Landsat data: Predicting Landsat surface reflectance at any given time. *Remote Sens. Environ.*, 2015, no. 162, pp. 67–83.

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.582.2

КЛИМАТ ЗОНАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ РАВНИН РОССИИ  
ПРИ СОВРЕМЕННОМ ГЛОБАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ  
В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

© 2023 г. Т. Б. Титкова<sup>а</sup>, \*, А. Н. Золотокрылин<sup>а</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*e-mail: titkova@igras.ru

\*\*e-mail: zolotokrylin@igras.ru

Поступила в редакцию 15.03.2022 г.

После доработки 15.02.2023 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

Изучены изменения климатических параметров в летний сезон между периодами 1961–1990 и 1991–2020 гг. в природных зонах равнинной части Европейской территории России и Западной Сибири. Для последнего тридцатилетия выявлены ландшафты со значимыми изменениями климатических параметров. Исследованы связи температуры воздуха и осадков с испарением и влажностью почвы. Установлено, что в суббореальных ландшафтах Европейской территории России отмечается ярко выраженное потепление, уменьшение суммарных осадков, испарения и влажности почвы. Показано, что статистически значимое потепление в июне и августе в арктических и бореальных ландшафтах Западной Сибири привело к росту испарения и иссушению почвы. На испарение и влажность верхнего слоя почвы наибольшее влияние оказывает температура: положительное в арктической и бореальной зонах и отрицательное в суббореальной. Влияние осадков на эти же параметры наиболее заметно в суббореальных ландшафтах. Оценка трендов температуры воздуха и испарения показала, что они были значимыми в последнее тридцатилетие в суббореальной зоне Европейской территории России и арктических ландшафтах Западной Сибири. В суббореальной зоне значительный рост температуры приводит к заметному падению испарения, что не наблюдается в бореальных ландшафтах.

*Ключевые слова:* ландшафты, природные зоны, температура, осадки, испарение, влажность почвы, ERA5-Land, европейская часть России, Западная Сибирь

DOI: 10.31857/S2587556623030111, EDN: QTNESR

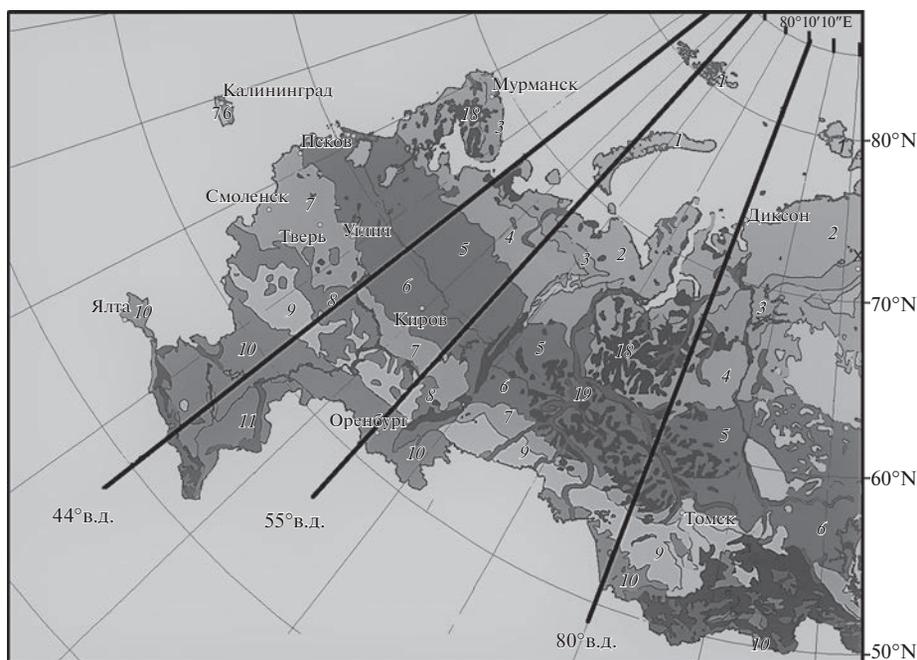
ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемое потепление климата и сопутствующие ему природные процессы на большей части нашей планеты отличается разнообразием и дискретностью (IPCC, 2013; Overland et al., 2016). Влияние изменения климата на динамику растительности зависит главным образом от приземной температуры воздуха и количества осадков. В (Wang et al., 2018) отмечается, что глобальное потепление может значительно повлиять на водный баланс за счет изменения испарения и увеличения дефицита почвенной влаги. При этом их флуктуации неоднородны в пространстве в результате региональных особенностей, внутренней стохастической изменчивости атмосферной циркуляции, а также нелинейности отклика циркуляции на глобальное потепление (Демченко, Семенов, 2017; Munang et al., 2013).

Климатические процессы приводят к многообразию откликов ландшафтов: как быстрому –

реакции на засухи, так и накопленному – на повышение глобальной температуры, выраженной в изменении состава и структуры растительного компонента (Золотокрылин, Титкова, 2009; Титкова, Виноградова, 2015; Тишков и др., 2020; Singh et al., 2003). Согласно предыдущим исследованиям экстремальные явления в течение короткого промежутка времени влияют на подстилающую поверхность значительно сильнее, чем постепенные изменения количества осадков и температуры (Vouwer, 2019). Реакция растительности на температуру и условия осадков более медленная при густой растительности и более быстрая при разреженной, что связано со скоростью теплообмена в толще растительного покрова (Wu et al., 2016).

В периоды 1961–1990 и 1991–2020 гг. в северной части Атлантики наблюдались две устойчивые аномалии температуры поверхности океана (ТПО), приведшие к серьезным климатическим



**Рис. 1.** Ландшафтная карта равнинной части России (Национальный ..., 2007 с дополнением) и профили исследования. Ландшафты: 1 – арктические, 2 – тундровые, 3 – лесотундровые, 4 – северо-таежные, 5 – среднетаежные, 6 – южно-таежные, 7 – подтаежные, 8 – широколиственно-лесные, 9 – лесостепные, 10 – степные типичные и сухостепные, 11 – полупустынные и пустынные, 18 – болота, 19 – речные долины и дельты.

последствиям для наземных экосистем во многих регионах мира (Semenov et al., 2010; Ting et al., 2009). В 1963–1994 гг. отмечалось преобладание отрицательной фазы аномалии ТПО Северной Атлантики (Черенкова, 2017), что сопровождалось относительно прохладной погодой и отсутствием значимых трендов температуры на Европейской территории России (ЕТР) и Западной Сибири (Бокучава, Семенов, 2018; Груза, Ранькова, 2012б). С середины 1990-х годов в Северной Атлантике преобладает положительная фаза аномалии ТПО (Второй ..., 2014; Киктев и др., 2009; Черенкова, 2017). Последний период также характеризуется существенным ослаблением крупномасштабной атмосферной циркуляции летнего сезона, что сказалось на термическом режиме ЕТР и Западной Сибири (Попова, 2018). Между периодами 1961–1990 и 1981–2010 гг. повысилась норма сезонной температуры воздуха на всей территории России, а для 20–40% площади эти изменения достигли 5%-го уровня значимости (Второй ..., 2014).

**Цели работы:** (1) выявить зональные ландшафты со значимыми изменениями климатических параметров в летний период; (2) оценить связь между изменениями климатических параметров и характеристиками подстилающей поверхности; (3) определить тренды климатических параметров в отдельных природных зонах ЕТР и Западной Сибири.

## ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Рассматриваются природные зоны равнинной территории ЕТР и Западной Сибири. В описании ландшафтной структуры была использована карта из Национального Атласа России (2007) (рис. 1). Анализировались климатические параметры в целом по природным зонам и отдельно на меридиональных разрезах 44° в.д., 55° в.д. и 80° в.д.

Для анализа использовались ежемесячные данные реанализа ERA5-Land с 1961 по 2020 г. за летний период<sup>1</sup>. ERA5-Land представляет собой набор данных пятого поколения с разрешением 0.1° × 0.1° (Muñoz-Sabater et al., 2021). Были обработаны массивы: общего количества осадков, температуры воздуха на высоте 2 м, испарения и влажности почвы в слое 0–7 см.

Наибольшая неопределенность реанализа ERA5 приходится на прибрежные ареалы (Muñoz-Sabater et al., 2021). Для ЕТР погрешность температуры составляет 0.2–0.3°C в зависимости от ландшафта, а величина осадков имеет заметную систематическую положительную ошибку в районе 20% для лесотундры и полупустыни ЕТР (Григорьев и др., 2020). В полупустыне, на фоне дефицита осадков, это отклонение может повлиять на расчеты вклада осадков в изменение испарения и влажности почвы. В центре ЕТР коэффи-

<sup>1</sup> <https://cds.climate.copernicus.eu/> (дата обращения 14.02.2022).

коэффициент корреляции Пирсона стационарных данных с массивами ERA5-Land в летний сезон составляет 0.66–0.83 для среднемесячных осадков и 0.99 для температуры, поэтому неопределенность данных реанализа в меньшей мере отражается на результатах трендов (Головинов, Васильева, 2022).

Для расчета испарения в ERA5-Land при существующих атмосферных условиях (давления и влажности воздуха) используется текущая температура самого нижнего слоя атмосферы, а также температура различных слоев почвы. Испарение, которое в системе прогнозирования (IFS) ECM-WF имеет отрицательный знак, было использовано с положительным знаком. Размерность влагосодержания почвы  $\text{м}^3/\text{м}^3$  переведена в проценты.

Расчет значимости климатических изменений между периодами 1991–2020 и 1961–1990 гг. был произведен в целом за летний период и отдельно по месяцам с вероятностью 95% по критерию Стьюдента. Для оценок значимости трендов также применен критерий Стьюдента для всех исследуемых параметров (вне зависимости от нормальности распределения, поскольку сравниваемые величины не составляют пару коррелирующих значений; тем самым выполняется одно из условий применения критерия Стьюдента).

Для расчета статистической связи климатических параметров и характеристик поверхности использовалась простая парная корреляция в целом за летний период 1961–2020 гг. на долготных разрезах  $44^\circ$  в.д.,  $55^\circ$  в.д. (центр и восток ЕТР) и  $80^\circ$  в.д. (центр Западной Сибири). Расчет производился по данным из узлов сетки в полосе  $0.2^\circ$  долготы соответствующего профиля.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Климатические изменения параметров по ландшафтным зонам*

На равнинах ЕТР и Западной Сибири в 1991–2020 гг. в среднем за лето наблюдалось положительное изменение температуры воздуха относительно 1961–1990 гг. Максимальный рост температуры отмечается на юге ЕТР (западная часть широколиственно-лесной, лесостепной и степной зоны, полупустыня) и на северо-востоке Западной Сибири (зоны тундр и лесотундр, восток северной тайги) до  $1.5$ – $2^\circ\text{C}$ . Такие результаты подтверждает оценка значимости изменений климатических параметров на долготных разрезах отдельно по летним месяцам на ЕТР ( $44^\circ$  в.д.,  $55^\circ$  в.д.) и в Западной Сибири ( $80^\circ$  в.д.) (табл. 1).

Летнее потепление ярче всего проявилось в июле и августе в центре ЕТР, южнее таежной зоны. В степи положительный сдвиг температуры прослеживается во все летние месяцы с максимумом до  $1.5^\circ\text{C}$  в августе. На востоке ЕТР повыше-

ние температуры отмечено: в июне – повсеместно (максимально в тундре до  $1.9^\circ\text{C}$ ); в июле – в Арктике и степи; в августе – в Арктике и южнее подтаежных ландшафтов. В Западной Сибири потепление прослеживается в июне от тундры до тайги (в лесотундре до  $3.3^\circ\text{C}$ ) и в августе от южной тайги до степи. Выделяется на общем фоне июльское понижение температуры в Западной Сибири от лесотундры до степи на  $-0.1$ ... $-0.3^\circ\text{C}$ .

Сумма осадков в целом за лето уменьшается на ЕТР южнее подтаежной зоны и растет на севере ЕТР и в Западной Сибири (рис. 2б). В центре ЕТР значительное падение сумм осадков наблюдается в июле от южной тайги до лесостепи и в августе в степи. Колебание осадков не значимо в июне (с положительной тенденцией) и в августе (с отрицательной). На востоке ЕТР значительное увеличение осадков наблюдается в июне от тундры до северной тайги и в июле в Арктике; в июле и августе в целом количество осадков уменьшается. В Западной Сибири колебание осадков не значимо с тенденцией роста в июне и июле от южной тайги до степи и с падением в июне от тундры до средней тайги, а в августе от средней тайги до степи (см. табл. 1).

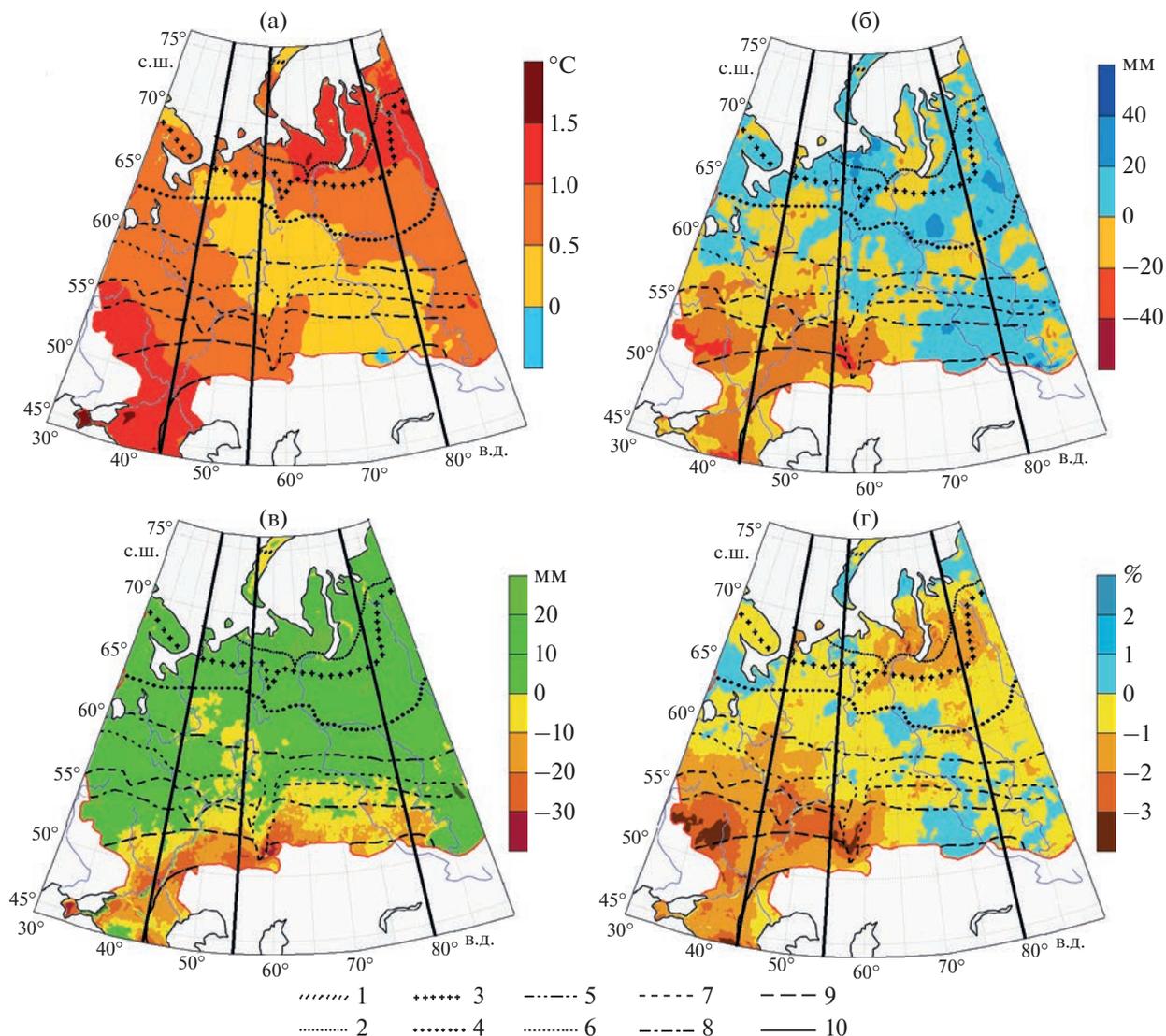
Изменившееся соотношение тепла и влаги привело к отклику подстилающей поверхности. В целом за летний период как на ЕТР, так и в Западной Сибири испарение увеличилось от Арктики до широколиственных лесов и уменьшилось от лесостепи до полупустыни (рис. 2в). В бореальных ландшафтах центральной части ЕТР при достаточном увлажнении и увеличении температуры тренды испарения положительные в июне и июле. В августе южнее таежной зоны испарение снижается, а в степи его падение происходит во все летние месяцы. Ближе к Уралу испарение растет: от Арктики до лесостепи – в июне; до южной тайги – в июле; в Арктике и тундре – в августе. В Западной Сибири на фоне значительного роста температуры и осадков в июне значимо увеличилось испарение от тундры до северной тайги. В остальные месяцы колебания испарения не значимы (см. табл. 1).

Потепление и снижение осадков в целом за летний период вызвало уменьшение влажности почвы практически на всей рассматриваемой территории с максимальным падением на юге ЕТР (рис. 2г). В центре ЕТР уменьшение влажности почвы отмечается во все месяцы лета. Значимое падение почвенной влаги наблюдается от южной тайги до лесостепи в июле и августе. На востоке ЕТР незначительный рост влажности почвы отмечен в северных ландшафтах и падение южнее северной тайги. В Западной Сибири потепление северных широт привело к значимому уменьшению почвенной влаги в июне от тундры до северной тайги и в августе от южной тайги до лесостепи.

**Таблица 1.** Изменения климатических параметров в летний период в ландшафтных зонах на профиле 44° в.д., 55° в.д. и 80° в.д. в 1991–2020 гг. относительно 1961–1990 гг.

Параметр	Температура, °С			Осадки, мм			Испарение, мм			Влажность почвы в слое 0–7 см, %		
	июнь	июль	август	июнь	июль	август	июнь	июль	август	июнь	июль	август
44° в.д.												
Северотаежная	00.5	00.6	00.4	00.8	00.9	20.3	10.1	10.5	00.5	–0.4	–0.7	00.4
Среднетаежная	00.5	<b>00.7</b>	00.4	–1.2	–5.3	–4.9	00.0	10.4	00.1	–0.8	–1.4	–0.6
Южнотаежная	00.5	<b>00.9</b>	00.5	10.5	<b>–15.8</b>	–0.8	10.5	1.9	–0.6	–0.7	<b>–2.0</b>	–1.5
Подтаежная	00.5	<b>00.9</b>	<b>00.6</b>	30.6	<b>–15.2</b>	–2.4	20.2	<b>30.3</b>	–0.6	–0.1	<b>–1.9</b>	<b>–2.0</b>
Широколиственно- лесные	00.5	<b>00.9</b>	<b>00.8</b>	00.0	<b>–17.4</b>	–0.1	20.0	20.9	–0.1	–0.1	<b>–2.2</b>	<b>–2.0</b>
Лесостепные	00.5	<b>10.0</b>	<b>00.9</b>	00.9	<b>–13.2</b>	–6.5	10.1	20.7	–2.3	–0.4	<b>–2.1</b>	<b>–2.6</b>
Степные типичные и сухостепные	10.0	<b>10.2</b>	<b>10.5</b>	–3.8	–8.1	<b>–10.9</b>	–1.7	–4.2	–7.5	–1.1	–1.4	–2.5
55° в.д.												
Арктическая	<b>0.7</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	2.3	<b>11.6</b>	–1.0	0.1	1.8	0.0	1.4	0.8	0.2
Тундровая	<b>1.9</b>	0.1	0.4	<b>14.9</b>	4.5	–1.6	<b>10.2</b>	0.6	0.2	–1.8	0.5	1.7
Лесотундровая	<b>1.5</b>	0.0	0.2	<b>15.2</b>	–2.1	–2.6	8.8	0.1	–0.3	–1.5	–0.5	0.8
Северотаежная	<b>1.0</b>	0.0	0.2	<b>11.2</b>	–3.7	–2.8	5.4	2.4	–1.0	–0.4	–0.2	–0.2
Среднетаежная	<b>0.7</b>	0.2	0.2	5.9	–7.6	0.8	2.5	1.0	–2.4	0.3	–1.1	–0.5
Южнотаежная	<b>0.5</b>	0.2	0.3	2.6	–8.0	0.3	3.2	0.0	–2.8	0.5	–0.9	–0.8
Подтаежная	<b>0.5</b>	0.2	<b>0.6</b>	2.4	<b>–14.2</b>	–0.2	2.5	–0.3	–0.2	–0.5	–1.4	–1.0
Лесостепные	<b>0.5</b>	0.2	<b>0.6</b>	2.4	<b>–14.2</b>	–0.2	2.5	–0.3	–0.2	–0.5	–1.4	–1.0
Степные типичные, сухостепные	<b>0.9</b>	<b>0.6</b>	<b>1.1</b>	–6.3	–8.2	–8.1	–5.7	<b>–11.1</b>	–9.8	–1.3	–1.4	<b>–2.1</b>
Полупустынные пустынные	<b>0.8</b>	0.4	<b>1.1</b>	–1.0	1.0	–3.9	–0.2	–1.4	–1.9	0.1	0.1	–0.5
80° в.д.												
Тундровая	<b>2.9</b>	0.2	0.3	4.8	–2.4	4.1	<b>14.1</b>	2.3	–0.2	–0.8	–1.9	0.2
Лесотундровая	<b>3.3</b>	–0.1	0.2	0.8	–4.6	7.0	<b>16.7</b>	–1.2	–0.8	<b>–3.5</b>	–1.4	–0.2
Северотаежная	<b>2.4</b>	–0.3	0.3	–1.8	–4.5	10.4	<b>14.0</b>	0.6	0.1	<b>–2.8</b>	–0.7	0.2
Среднетаежная	<b>1.2</b>	–0.2	0.5	5.0	–4.1	–3.0	3.7	1.9	–0.2	–0.6	0.4	–1.4

Примечание. Полужирным выделены значимые изменения с вероятностью 0.95 по критерию Стьюдента.



**Рис. 2.** Изменение климатических параметров между 1991–2020 и 1961–1990 гг. в среднем за лето: (а) температуры воздуха на 2 м (°C), (б) суммы осадков (мм), (в) испарение,  $E_v$  (мм/м<sup>3</sup>), (г) влажность верхнего слоя почвы глубиной до 7 см,  $Sw$  (%).

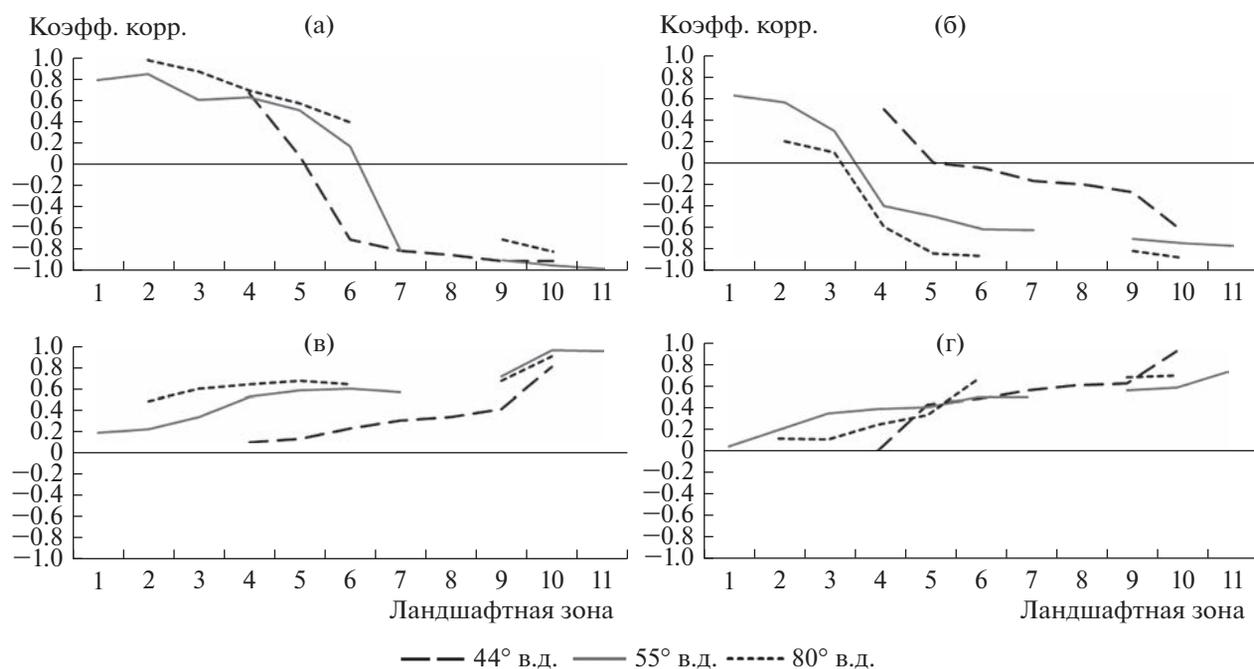
*Примечание:* Статистически значимые изменения для температуры  $>(<)0.5^{\circ}C$  ( $-0.5^{\circ}C$ ), осадков и испарения  $>(<)10$  мм ( $-10$  мм), влажности верхнего слоя почвы  $>(<)2\%$  ( $-2\%$ ). Показаны южные границы ландшафтных зон (номера зон см. на рис. 1).

Таким образом, из сравнения средне-летних климатических параметров в двух последовательных тридцатилетних периодах значимые изменения просматриваются главным образом на ЕТР в суббореальных ландшафтах – от лесостепных до полупустынных. Здесь ярко выражено потепление, падение сумм осадков, что отразилось на уменьшении влажности почвы и падении испарения во вторую половину летнего периода. В Западной Сибири в арктических и бореальных ландшафтах июньское и августовское потепление привели к увеличению испарения и уменьшению

почвенной влаги. Здесь же можно отметить слабое июльское похолодание на большей части Западной Сибири, кроме зоны тундры.

*Связь между изменениями климатических параметров и характеристиками поверхности*

Анализ связи испарения и влажности почвы с температурой и осадками показал, что в летний период от Арктики до средней тайги интенсивность испарения пропорциональна температуре. Корреляция испарения с температурой положи-



**Рис. 3.** Связь коэффициентов линейной корреляции испарения и температуры (а), влажности почвы и температуры (б), испарения и осадков (в), влажности почвы и осадков (г) по ландшафтными зонам на долготных разрезах 44° в.д., 55° в.д. и 80° в.д. в среднем за лето 1961–2020 гг. Цифрами обозначены ландшафты (см. рис. 1).

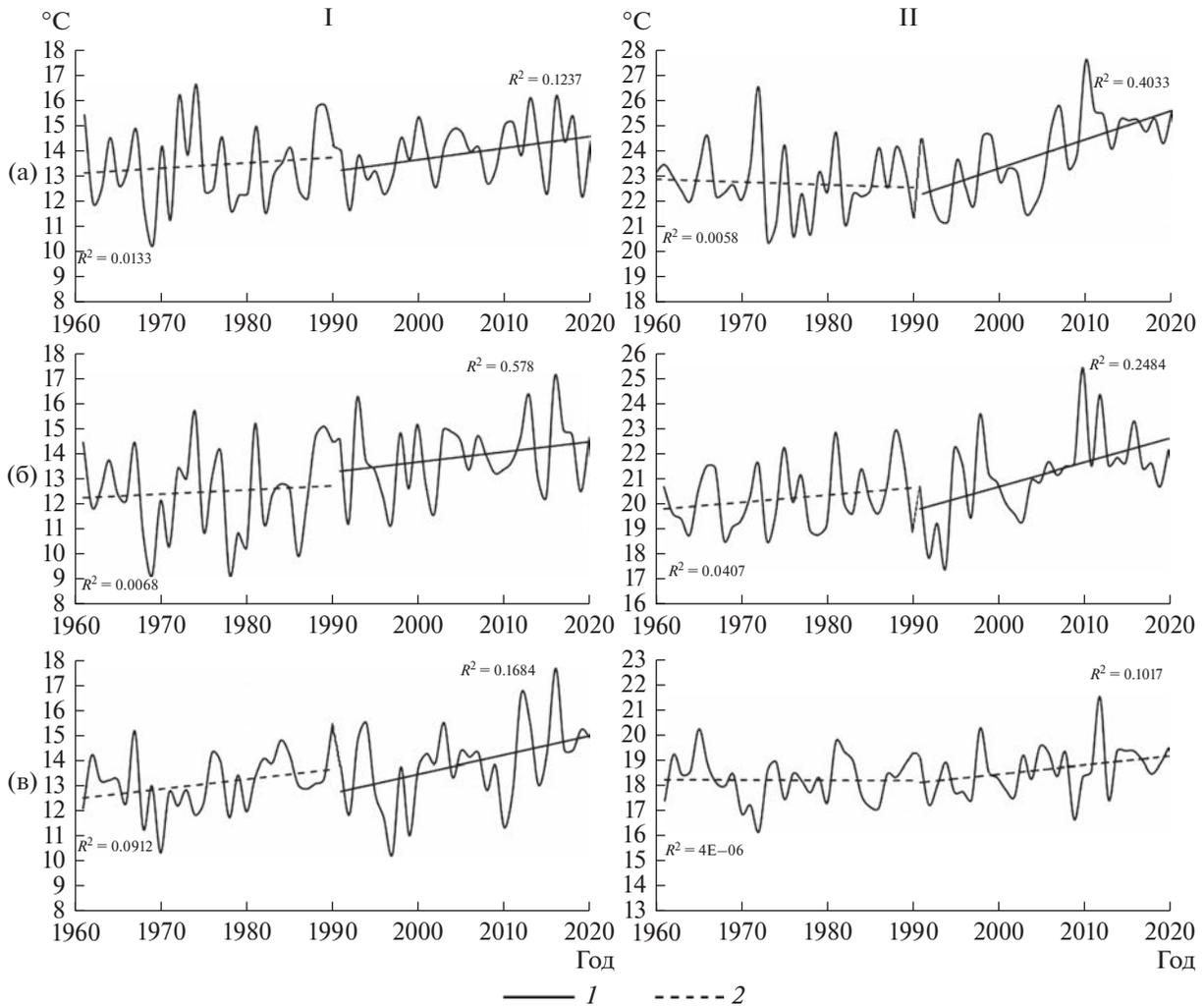
тельна с коэффициентом 0.6–0.8. Южнее широколиственной зоны эти зависимости нарушаются и становятся обратными (корреляция  $-0.6...-0.9$ ), так как увядающая растительность и иссушение почвы при высоких температурах препятствуют увеличению испарения, особенно в степи и полупустыне (рис. 3а). Аналогичный характер соотношения наблюдается у влажности почвы и температуры воздуха, для которых переход от положительной к отрицательной связи происходит в таежных ландшафтах (рис. 3б). Корреляция температуры воздуха и влажности почвы положительна в зонах с избыточным увлажнением от Арктики до южной тайги. Южнее, при недостатке летнего увлажнения, связь становится отрицательной. Подобные зависимости наблюдаются на всех трех меридиональных разрезах. Корреляция осадков и испарения слабо положительная в субарктических и бореальных ландшафтах как на ЕТР, так и в Западной Сибири. В зонах с недостатком летнего увлажнения (в лесостепной–полупустынной) она возрастает и становится 0.5–0.9 (рис. 3в). Связь осадков и влажности почвы положительна и значима южнее подтаежной зоны (рис. 3г).

Таким образом, в летний период на испарение и влажность верхнего слоя почвы наибольшее влияние оказывает температура: положительное в арктических и бореальных ландшафтах и отрица-

тельное в суббореальных. Вклад осадков в изменение испарения и влажности почвы заметнее всего в суббореальной зоне.

#### *Климатические тренды параметров в ландшафтных зонах*

Рассмотрим межгодовые изменения температуры воздуха и испарения в северотаежных и степных ландшафтах, которые из-за густоты растительности обладают разной скоростью теплообмена (Klein et al., 2017; Wu et al., 2016). Как показано выше, эти ландшафты в летний период имеют противоположные зависимости испарения от температуры: прямую в северной тайге и обратную в степи. Тренд температуры в северотаежной зоне на всех разрезах слабо положителен и не достигает уровня значимости в период 1961–1990 гг. (рис. 4-1). Тренды испарения здесь также не значимы (рис. 5-1). В период 1991–2020 гг. увеличение температуры значимо на всех долготных профилях ЕТР и Западной Сибири. При этом рост испарения отмечается на всех разрезах, но не значим на востоке ЕТР (профиль 55° в.д.) (см. рис. 4б, 5б-1). То есть в бореальных ландшафтах потепление вызывает увеличение испарения, но рост температуры может быть недостаточен для значимого роста испарения (см. рис. 4б, 5б-1).



**Рис. 4.** Межгодовые изменения температуры летом в северотаежной (I) и степной (II) ландшафтных зонах на долготных разрезах, 1961–2020 гг.: (а) 45° в.д., (б) 55° в.д. и (в) 80° в.д. Линейные тренды: 1 – значимый, 2 – не значимый.

В степной зоне картина отличается. В период 1961–1990 гг. наблюдается отсутствие тренда температуры и испарения (см. рис. 4-II). В последующий период потепления на ЕТР привело к значимому падению испарения в степи (см. рис. 5а, б-II). В Западной Сибири слабый рост температуры сопровождается незначимым падением испарения (см. рис. 4в, 5в-II). Таким образом, в суббореальных ландшафтах значимый рост температуры приводит к значимому отрицательному отклику испарения.

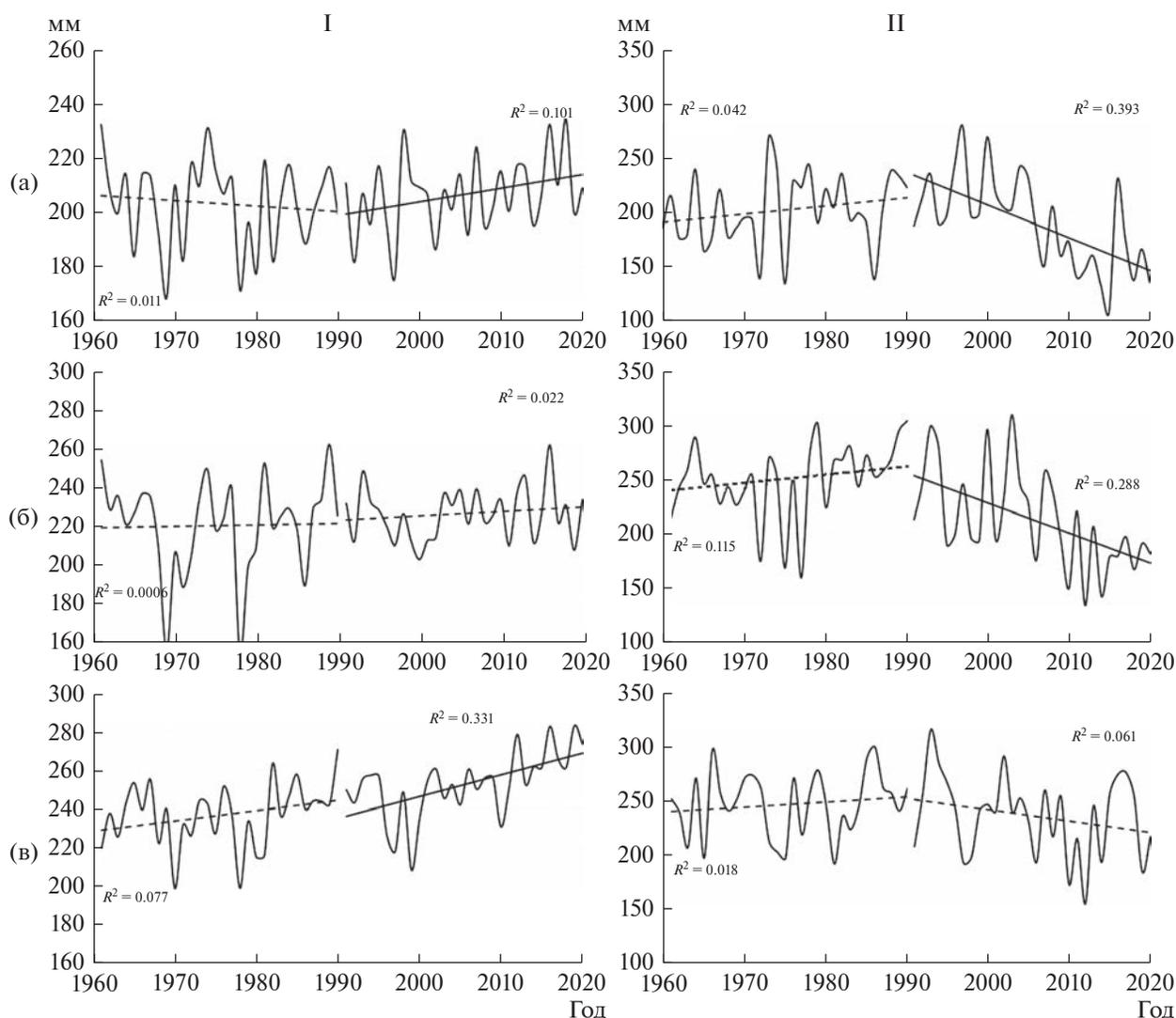
### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты нашей работы во многом подтверждают выводы предыдущих исследований относительно летнего потепления на ЕТР и в Западной Сибири.

В частности, подтвердились, следующие тенденции:

- интенсивная область июльского потепления на западе и юго-западе ЕТР в период 1976–2019 гг. (Переведенцев и др., 2021; Третий ..., 2022; и др.);
- неравномерность летнего потепления в Западной Сибири, с отсутствием июльского потепления в центре Западной Сибири (Бардин и др., 2016; Павленко, Сергеев, 2006; Переведенцев и др., 2021; Попова, 2018; Титкова, Золотокрылин, 2021; и др.);
- уменьшение испарения и влажности почвы с начала XX в. в степных ландшафтах (Глобальный ..., 2021; Золотокрылин и др., 2018; Титкова, Золотокрылин, 2022; Черенкова, 2021).

Наше исследование дополняет предыдущие анализом связей испарения и влажности почвы с температурой и осадками от тундры до полупустыни при потеплении, а дает более детальное



**Рис. 5.** Межгодовые изменения испарения летом в северотаежной (I) и степной (II) ландшафтных зонах на долготных разрезах, 1961–2020 гг.: (а) 45° в.д., (б) 55° в.д. и (в) 80° в.д. Условные обозначения см. рис. 4.

описание наблюдаемого потепления в природных зонах равнин ЕТР и Западной Сибири.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В летний период потепления 1991–2020 гг. относительно 1961–1990 гг. значимые изменения климатических параметров просматриваются на ЕТР в суббореальных ландшафтах от лесостепных до полупустынных. Здесь проявляется ярко выраженное потепление, падение сумм осадков и испарения, уменьшение влажности почвы. В бореальной зоне равнин ЕТР от северной тайги до широколиственных лесов изменение климатических характеристик между 30-летними периодами не достигло уровня значимости. В арктических и бореальных ландшафтах Западной Сибири отмечается июньское и августовское потепление

с увеличением осадков, что привело к увеличению испарения. В суббореальной зоне Западной Сибири значимых изменений климатических параметров не произошло.

На испарение и влажность верхнего слоя почвы наибольшее влияние оказывает температура: положительное в арктических и бореальных ландшафтах и отрицательное в суббореальных. Влияние осадков на эти же параметры наиболее заметно в суббореальных районах. В таежной зоне рост температуры не сопровождается значимым положительным откликом испарения, что скорее всего связано с влиянием густоты растительного покрова и, как следствие, с замедленным теплообменом. В суббореальных ландшафтах повышение температуры приводит к падению испарения.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009).

## FUNDING

The study was carried out within the framework of the state task of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Самохина О.Ф.* Температурные экстремумы июня и июля 2016 года // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. № 2. С. 143–148.
- Бокучава Д.Д., Семенов В.А.* Анализ аномалий приземной температуры воздуха в северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. Т. 1. С. 28–51. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-28-51>
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Гл.: 1.2.3.; 1.3.2. М.: Изд-во Росгидромета, 2014. 1009 с.
- Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство) // *Национальный докл. М., 2021. Т. 3. 700 с.* <https://doi.org/10.52479/978-5-6045103-9-1>
- Головинов Е.Э., Васильева Н.А.* Сравнение многолетних метеорологических характеристик по данным реанализа и наземных наблюдений на территории Московской области // *Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика*. 2022. Т. 12. № 3. С. 92–105. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-92-105>
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М.* Оценка точности данных реанализа ERA-5 // В сб.: *Труды IX Международ. науч.-практ. конф. “Морские исследования и образование (MARESE-DU-2020)”*. Сборник. М., 2020. Т. 2. С. 47–50.
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Динамические климатические нормы температуры воздуха // *Метеорология и гидрология*. 2012а. № 12. С. 5–18.
- Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2012б. 194 с.
- Демченко П.Ф., Семенов В.А.* Оценка неопределенности климатических трендов приповерхностной температуры, связанной с внутренней динамикой атмосферы // *ДАН*. 2017. Т. 476. № 3. С. 339–342. <https://doi.org/10.7868/S0869565217270202>
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б.* Климатический фактор динамики растительности засушливых земель Европейской территории России // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. М.: ИГКЭ, 2009. Т. XXII. С. 79–91.
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А.* Увлажнение засушливых земель Европейской территории России: настоящее и будущее // *Аридные экосистемы*. 2014. Т. 20. № 2 (59). С. 5–11.
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б.* Биоклиматическая субгумидная зона на равнинах России: засухи, опустынивание/деградация // *Аридные экосистемы*. 2018. Т. 24. № 1 (74). С. 13–20.
- Киктев Д.В., Сизе Д., Александер Л.* Сравнение многолетних средних и тенденций изменения ежегодных экстремумов температуры и осадков по данным моделирования и наблюдений // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. № 3. С. 305–315.
- Национальный Атлас России. Ландшафтная карта. 2007. Т. 2 / М-6: 1:30000000. С. 331. <https://national-atlas.ru/tom2/331.html>
- Павленко В.А., Сергеев А.А.* Потепление климата Западной Сибири и возможные эколого-экономические последствия // *СГГА Новосибирск*. 2006. С. 1–7.
- Переведенцев Ю.П., Васильев А.А., Шерстюков Б.Г., Шанталинский К.М.* Климатические изменения на территории России в конце XX – начале XXI века // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 10. С. 14–26.
- Попова В.В.* Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. № 1. С. 84–111. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-84-111>
- Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н.* Региональная неравномерность летнего потепления материковой Арктики // *Арктика: экология и экономика*. 2021. № 3. С. 374–384.
- Титкова Т.Б., Виноградова В.В.* Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86.
- Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н.* Летние климатические изменения на юге европейской России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8. № 1. С. 107–121. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-1-107-121>
- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Лаппо Е.Г., Морозова О.В., Покровская И.В., Тертицкий Г.М., Титова С.В., Царевская Н.Г.* Региональные биогеографические эффекты “быстрых” изменений климата в Российской Арктике в XXI в. // *Арктика: экология и экономика*. 2020. № 2 (38). С. 31–44. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-2-31-44>
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Росгидромет. Научное издание, 2022. 676 с.
- Черенкова Е.А.* Влияние изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции и температуры поверхности океана на тренды летних осадков на европейском севере России по наземным и спутниковым данным // *Современные проблемы*

- дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 229–238.
- Черенкова Е.А. Сезонные осадки на территории Восточно-Европейской равнины в периоды теплых и холодных аномалий температуры поверхности северной Атлантики // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 5. С. 72–81.  
https://doi.org/10.7868/s0373244417050061
- Черенкова Е.А. Тренды изменений атмосферного и почвенного увлажнения в начале XXI-го века на европейской территории России по спутниковым и наземным данным / В кн.: Материалы 19-й Международной конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: Институт космических исследований РАН, 2021. С. 390.
- Bouwer L.M. Observed and projected impacts from extreme weather events: Implications for loss and damage. In: Loss and Damage from Climate Change. Switzerland, Cham: Springer, 2019. P. 63–82.
- IPCC. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5). Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge Univ. Press, 2013.
- Klein C., Bliedernicht J., Heinzeller D., Gessner U., Klein I., Kunstmann H. Feedback of observed interannual vegetation change: A regional climate model analysis for the West African monsoon // Clim. Dyn. 2017. Vol. 48. P. 2837–2858.
- Munang R., Thiaw I., Alverson K., Liu J., Han Z. The role of ecosystem services in climate change adaptation and disaster risk reduction // Current Opinion in Environ. Sustainability. 2013. № 5. P. 1–6.  
https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.02.002
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D., Rodríguez-Fernández J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J. ERA5-Land: a state-of-the-art global re-analysis dataset for land applications // Earth Syst. Sci. Data. 2021. № 13. P. 4349–4383.  
https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021
- Overland J., Dethloff K., Francis J., Hall R., Hanna E., Kim S.J., Screen J., Shepherd T.G., Vihma T. Nonlinear response of midlatitude weather to the changing Arctic // Nature Climate Change. 2016. Vol. 6. P. 992–999.  
https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3121
- Semenov V.A., Latif M., Dommengeset D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature // J. Climate. 2010. Vol. 23 (21). P. 5668–5677.  
https://doi.org/10.1175/2010JCLI3347.1
- Singh R.P., Roy S., Kogan F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India // Int. J. Remote Sens. 2003. № 24. P. 4393–4402.  
https://doi.org/10.1080/0143116031000084323
- Ting M., Kushnir Y., Seager R., Li C. Forced and internal twentieth-century SST trends in the North Atlantic // J. Climate. 2009. № 22. P. 1469–1481.  
https://doi.org/10.1175/2008JCLI2561.1
- Wang X., Wu C., Peng D., Gonsamo A., Liu Z. Snow cover phenology affects alpine vegetation growth dynamics on the Tibetan Plateau: Satellite observed evidence, impacts of different biomes, and climate drivers // Agric. For. Meteorol. 2018. № 256. P. 61–74.
- Wu M., Schurgers G., Rummukainen M., Smith B., Samuelsen P., Jansson C., Silberg J., May W. Vegetation-climate feedbacks modulate rainfall patterns in Africa under future climate change // Earth Syst. Dyn. 2016. № 7. P. 627–647.  
https://doi.org/10.5194/esd-7-627-2016

## The Climate of Zonal Plain Landscapes of Russia during the Modern Global Warming in Summer

T. B. Titkova<sup>1, \*</sup> and A. N. Zolotokrylin<sup>1, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

\*e-mail: titkova@igras.ru

\*\*e-mail: zolotokrylin@igras.ru

Changes in climate parameters and surface characteristics were considered between 1961–1990 and 1991–2020 climate periods on the plains of the European part of Russia and Western Siberia in different landscape zones in summer. Zonal landscapes with a significant change in climate parameters in the 1991–2020 period of warming were identified, connections between changes of climate parameters and landscape characteristics were determined, climate trends of parameters in particular landscape zones were considered. In the 1991–2020 summer period of warming, significant changes in climate parameters were identified in subboreal landscapes from forest steppe to semi-desert on the European part of Russia. A pronounced warming, a decrease of precipitation total, evaporation and soil water are noted. In Western Siberia in arctic and boreal landscapes, a warming in June and August is observed, which led to an increase of evaporation and soil draining. In boreal landscapes of the European part of Russia and subboreal landscapes of Western Siberia, significant changes in climate parameters did not occur. The analysis of connection between evaporation with soil water and temperature with precipitation in landscape zones indicates about its reliance on landscape zone. Temperature has the most impact on evaporation and topsoil water, it is positive in arctic and boreal landscapes and negative in subboreal ones. Precipitation has the most positive impact in subboreal landscapes. In boreal landscapes, a significant temperature rise may be insufficient for a significant increase of

evaporation, apparently due to the impact of dense vegetation cover with a slow heat exchange. In subboreal landscapes, a significant temperature rise leads to a significant negative response of evaporation due to a quick heat exchange.

*Keywords:* landscapes, natural zones, temperature, precipitation, evapotranspiration, soil water, ERA5-land, European part of Russia, Western Siberia

## REFERENCES

- Bardin M.Yu., Rankova E.Ya., Samokhina O.F. Temperature extremes in June and July 2016. *Fundamental. i Prikladn. Klimatol.*, 2016, no. 2, pp. 143–148. (In Russ.).
- Bokuchava D.D., Semenov V.A. Analysis of surface air temperature anomalies in the Northern hemisphere in the 20th century using observational and reanalysis data. *Fundamental. i Prikladn. Klimatol.*, 2018, no. 1, pp. 28–51. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-28-51>
- Bouwer L.M. Observed and projected impacts from extreme weather events: Implications for loss and damage. In *Loss and Damage from Climate Change*. Springer: Cham, Switzerland, 2019, pp. 63–82.
- Cherenkova E.A. Trends in changes in atmospheric and soil moisture at the beginning of the 21st century on the European territory of Russia according to satellite and ground data. In *Proceedings of the 19th Intern. Conf. "Modern problems of remote sensing of the Earth from space"*. Moscow: Kosmicheskie Issledovaniya Ross. Akad. Nauk, 2021. 390 p.
- Cherenkova E.A. Influence of changes in large-scale atmospheric circulation and ocean surface temperature on trends in summer precipitation in the European North of Russia according to ground and satellite data. *Sovrem. Probl. Distantion. Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2018, vol. 15, no. 5, pp. 229–238. (In Russ.).
- Cherenkova E.A. Seasonal precipitation in the east European plain during the periods of warm and cool anomalies of the north Atlantic surface temperature. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017, no. 5, pp. 72–81. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.7868/s0373244417050061>
- Demchenko P.F., Semenov V.A. Estimation of uncertainty in surface air temperature climatic trends related to the internal dynamics of the atmosphere. *Dokl. Earth Sci.*, 2017, vol. 476, no. 1, pp. 1105–1108.  
<https://doi.org/10.1134/S1028334X17090239>
- Global climate and soil cover in Russia: manifestations of drought, prevention measures, control, elimination of consequences and adaptation measures (agriculture and forestry). Moscow, 2021, vol. 3, 700 p.
- Golovinov E.E., Vasil'yeva N.A. Comparison of long-term meteorological characteristics according to reanalysis and ground-based observations on the territory of the Moscow region. *Melioratsiya, Upravlenie Vodnymi Resursami i Agrofizika*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 92–105. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-92-105>
- Grigor'ev V.Yu., Frolova N.L., Kireeva M.B., Stepanenko V.M. Otsenka tochnosti dannykh reanaliza ERA-5. In *Trudy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Morskije issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2020)"*. Moscow, 2020, vol. 2, pp. 47–50. (In Russ.).
- Gruza G.V., Ran'kova E.Ya. Dynamic climatic norms of air temperature. *Meteorol. i Gidrol.*, 2012a, no. 12, pp. 5–18. (In Russ.).
- Gruza G.V., Ran'kova E.Ya. *Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozdukhha* [Observed and Expected Climate Changes in Russia: Air Temperature]. Obninsk: FGBU "VNIIGMI-MCD", 2012b. 194 p.
- IPCC. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5). Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- Kiktev D.V., Size D., Alexander L. Comparison of long-term averages and trends in annual temperature and precipitation extremes based on modeling and observational data. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fizika Atmosfery i Okeana*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 305–315. (In Russ.).
- Klein C., Blifernicht J., Heinzler D., Gessner U., Klein I., Kunstmann H. Feedback of observed interannual vegetation change: A regional climate model analysis for the West African monsoon. *Clim. Dyn.*, 2017, vol. 48, pp. 2837–2858.
- Munang R., Thiaw I., Alverson K., Liu J., Han Z. The role of ecosystem services in climate change adaptation and disaster risk reduction. *Curr Opin Environ Sustain*, 2013, no. 5, pp. 1–6.  
<https://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2013.02.002>
- Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D., Piles M., Rodríguez-Fernández J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data*, 2021, no. 13, pp. 4349–4383.  
<https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- National Atlas of Russia*. Landscape map. 1 : 30000000. Moscow, 2007, vol. 2, 331 p. <https://nationalatlas.ru/tom2/331.html>
- Overland J., Dethloff K., Francis J., Hall R., Hanna E., Kim S.J., Screen J., Shepherd T.G., Vihma T. Nonlinear response of midlatitude weather to the changing Arctic. *Nat. Clim. Chang.*, 2016, vol. 6, pp. 992–999.  
<https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3121>
- Pavlenko V.A., Sergeev A.A. Climate warming in Western Siberia and possible environmental and economic consequences. *SGGA Novosibirsk*, 2006, pp. 1–7. (In Russ.).
- Perevedentsev Yu.P., Vasiliev A.A., Sherstyukov B.G., Shantalinsky K.M. Climatic changes in Russia in the late 20th – early 21st century. *Meteorol. i Gidrol*, 2021, no. 10, pp. 14–26. (In Russ.).

- Popova V.V. Modern climate changes in the north of Eurasia as a manifestation of large-scale atmospheric circulation variations. *Fundamental. i Priklad. Klimatol.*, 2018, no. 1, pp. 84–111. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-84-111>
- Semenov V.A., Latif M., Dommengot D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature. *J. Clim.*, 2010, vol. 23 (21), pp. 5668–5677.  
<https://doi.org/10.1175/2010JCLI3347.1>
- Singh R.P., Roy S., Kogan F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *Int. J. Remote Sens.*, 2003, no. 24, pp. 4393–4402.  
<https://doi.org/10.1080/0143116031000084323>
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Chapters: 1.2.3.; 1.3.2. Moscow: Roshydromet, 2014. 1009 p.
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Third Assessment Report on Climate Change and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation]. St.-Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii; Roshydromet. 2022. 676 p.
- Ting M., Kushnir Y., Seager R., Li C. Forced and internal twentieth-century SST trends in the North Atlantic. *J. Clim.*, 2009, no. 22, pp. 1469–1481.  
<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2561.1>
- Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Weisfeld M.A., Glazov P.M., Lappo E.G., Morozova O.V., Pokrovskaya I.V., Tertitsky G.M., Titova S. V., Tsarevskaya N.G. Regional biogeographic effects of “fast” climate changes in the Russian arctic in the 21st century. *Arktika: Ekol. i Ekon.*, 2020, no. 2 (38), pp. 31–44. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-2-31-44>
- Titkova T.B., Zolotokrylin A.N. Regional irregularity of summer warming in the continental Arctic. *Arktika: Ekol. i Ekon.*, 2021, no. 3, pp. 374–384. (In Russ.).
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. The response of vegetation to climate change in boreal and subarctic landscapes at the beginning of 21 century. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 75–86. (In Russ.).
- Titkova T.B., Zolotokrylin A.N. Summer climatic changes in the south of European Russia. *Fundamental. i Priklad. Klimatol.*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 107–121. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-1-107-121>
- Wang X., Wu C., Peng D., Gonsamo A., Liu Z. Snow cover phenology affects alpine vegetation growth dynamics on the Tibetan Plateau: Satellite observed evidence, impacts of different biomes, and climate drivers. *Agric. For. Meteorol.*, 2018, no. 256, pp. 61–74.
- Wu M., Schurgers G., Rummukainen M., Smith B., Samuelsson P., Jansson C., Siltberg J., May W. Vegetation–climate feedbacks modulate rainfall patterns in Africa under future climate change. *Earth Syst. Dyn.*, 2016, no. 7, pp. 627–647.  
<https://doi.org/10.5194/esd-7-627-2016>
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Bioclimatic sub-humid zone on the plains of Russia: droughts, desertification/degradation. *Arid. Ekosist.*, 2018, vol. 24, no. 1 (74), pp. 13–20. (In Russ.).
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B. Climatic factor of vegetation dynamics in arid lands of the European territory of Russia. In *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Problems of Ecological Monitoring and Modeling of Ecosystems]. Moscow: IGKE, 2009, vol. 22, pp. 79–91.
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A. Humidification of drylands in European Russia: the present and future. *Arid. Ekosist.*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 49–54. (In Russ.).

УДК 551.89

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ РАННЕХВАЛЫНСКОЙ ТРАНСГРЕССИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

© 2023 г. Р. Н. Курбанов<sup>a, b, \*</sup>, В. Р. Беляев<sup>a</sup>, М. И. Свистунов<sup>b</sup>, Е. А. Бутузова<sup>b</sup>,  
Д. А. Солодовников<sup>c</sup>, Н. А. Таратунина<sup>a, b</sup>, Т. А. Янина<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>b</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>c</sup>Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

\*e-mail: kurbanov@igras.ru

Поступила в редакцию 18.09.2022 г.

После доработки 16.01.2023 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

В статье представлены результаты первой детальной абсолютной хронологии раннехвалынской трансгрессии Каспийского моря на основе датирования методом оптически-стимулированной люминесценции (ОСЛ) и их обсуждение. Исследование проведено для особой фации хвалынских отложений – шоколадных глин, широко распространенных в Прикаспийской низменности. В изученных опорных разрезах Нижнего Поволжья (Средняя Ахтуба, Райгород, Ленинск) шоколадные глины имеют значительную мощность, в их строении выделяется три подфации: пачка переслаивания песков и суглинков, пачка монолитных плотных глин и венчающая разрез характерная пачка с тонкими пропластами алевролита, образующими характерную мелкоплитчатую структуру. Первая пачка отражает условия начального этапа проникновения хвалынских вод в район расположения разреза, вторая – условия глубоководного залива, третья – время регрессии со значительным участием аллювиальных процессов в осадконакоплении. ОСЛ-хронология получена по результатам параллельного датирования по кварцевым и полевошпатовым зернам с применением современных протоколов измерений люминесценции минералов. Результаты датирования свидетельствуют о формировании нижнехвалынских морских отложений в северной части Нижнего Поволжья в период между 27 и 14 тыс. л. н. Данные о возрасте хвалынских отложений дополнительно подтверждены датами по вышележащим каштановым почвам (9.6–0.7 тыс. л. н.) и подстилающим лёссово-почвенным сериям (37–19 тыс. л. н.). Люминесцентное датирование высокого разрешения позволило впервые выделить четыре стадии развития хвалынской трансгрессии в Нижнем Поволжье: первоначального проникновения вод до уровня ~5 м абс. (27 тыс. л. н.); стадию стабилизации и постепенного подъема уровня с ~5 до 7 м абс. (27–20 тыс. л. н.); этап активного повышения уровня моря до максимальных значений и перемещения береговой линии на север (17–15 тыс. л. н.); финальную регрессивную фазу с падением уровня моря (15–14 тыс. л. н.).

**Ключевые слова:** Каспийское море, хвалынская трансгрессия, колебания уровня моря, ОСЛ-датирование, геохронология, поздний плейстоцен, палеогеография, шоколадные глины

**DOI:** 10.31857/S2587556623030081, **EDN:** QSLXBQ

### ВВЕДЕНИЕ

Каспийское море является уникальным объектом для изучения истории развития природной среды Северной Евразии, сохраняя в донных отложениях запись динамики климатических условий всего водосборного бассейна. Четвертичные отложения Каспия – ценный архив эволюции природной среды центра Евразии: ледниково-межледниковые циклы Русской равнины, Кавказа и Центральной Азии, глобальные и региональные изменения климата. Систематическое изучение четвертичной истории Каспийского региона

продолжается уже более 100 лет (Андрусов, 1889). На основе комплексных исследований детально охарактеризовано строение отложений (Свиточ, 2014), разработана подробная хроностратиграфическая схема (Федоров, 1978), выделены береговые линии древних бассейнов Каспия (Рычагов, 1997), предложены различные варианты кривой колебания уровня моря (Рычагов, 2014; Свиточ, 2007). Из всех участков побережья Каспийского моря Прикаспийская низменность является наиболее изученным районом: здесь, в Нижнем Поволжье, описана серия разрезов в протяженном

обнажении вдоль абразионных берегов Волги и Ахтубы, выделен ряд стратотипов каспийского плейстоцена (Свиточ, 2014).

В сложной и динамичной позднеплейстоценовой истории Каспийского моря выделяется одно очень яркое событие — хвалынская трансгрессия, одна из крупнейших по своим масштабам и относительному подъему уровня (Рычагов, 2014; Свиточ, 2007). Последние данные, полученные по акватории и различным участкам побережья, свидетельствуют о наличии трех стадий трансгрессии. Результаты анализа керн скважин Северного Каспия указывают на существование стадии, которая фиксируется по морским отложениям с хвалынской фауной выше субаэральных ательских отложений (Безродных и др., 2017). Это событие не было описано в прибрежных обнажениях и выделяется как самая ранняя стадия, для которой предложено название палеохвалынская или древнехвалынская трансгрессия (Yanina et al., 2018). Палеохвалынская стадия отражает самое начало трансгрессии, которая развивалась после значительного снижения уровня моря, когда, по-видимому, вся акватория Северного Каспия была осушена. В это время произошел подъем уровня моря примерно до значений, близких к современному положению Каспия. По данным датирования керн скважин, развитие палеохвалынской стадии, по-видимому, происходило в интервале от 36 тыс. л. н. до максимума последнего оледенения (Yanina et al., 2018).

Последовавшая затем раннехвалынская стадия была временем максимального развития трансгрессии и резкого увеличения уровня и площади Каспия. Согласно классическим представлениям (Свиточ, 2014; Федоров, 1978), уровень моря достиг 45–50 м абс., а площадь превысила 1 млн км<sup>2</sup>, каспийские воды проникли глубоко в Прикаспийскую низменность, Западно-Туркменскую низменность и Каракумы, образовались пролив в Маньчжурской депрессии и широкие заливы в долине Волги, Куры, Урала и Узбоя. Следы этого события охарактеризованы на всех участках каспийского побережья. Точный максимальный уровень все еще является предметом дискуссий, но большинство специалистов определяют его в промежутке 45–50 м абс. (Рычагов, 1997; Свиточ, 2014). Таким образом, размах трансгрессии характеризуется подъемом уровня на более чем 100 м. Последовавшая после кратковременной енотаевской регрессии позднехвалынская стадия была незначительной по размерам. Эта стадия фиксируется как геоморфологическими свидетельствами (наличием выраженной морской террасы), так и биостратиграфией (Свиточ, 2007): раннехвалынский фаунистический комплекс характеризуется преобладанием в составе моллюсков видов *Didacna protracta*, *D. parallella*, *D. ebersini*, редкими *D. praetrigonoides*, в то время как позд-

нехвалынский комплекс — тем же составом дидакн, но с четким преобладанием *Didacna praetrigonoides*. При этом существует мнение, что поздняя стадия не является самостоятельным событием, а лишь фиксирует период кратковременной стабилизации уровня в условиях регрессивной тенденции бассейна (Лаврушин и др., 2014).

Существуют две основные точки зрения на возраст раннехвалынской стадии. Сторонники “древнего” возраста считают, что трансгрессия развивалась в период от 70 до 30 тыс. л. н. Авторы подчеркивают как необходимость значительного времени для заполнения огромным объемом воды каспийской котловины до максимального уровня бассейна, так и стадийное развитие трансгрессии с периодами стабилизации уровня, необходимыми для формирования морских террас и стадийных береговых линий, хорошо выраженных на разных участках побережья (Рычагов, 2014). Эта аргументация поддерживается датами на основе разных методов: термолюминесцентный (ТЛ) по методике Морозова—Шелкопляса — 72–47 тыс. л. н. (Рычагов, 1997), ТЛ по методике Шлюкова—Шаховца — 48–10 тыс. л. н. (Шаховец, 1987), U-Th — 30–25 тыс. л. н. и единичными радиоуглеродными — 31–28 тыс. л. н. (Mamedov, 1997).

Сторонники “молодого” возраста раннехвалынской стадии трансгрессии указывают на гораздо более многочисленные результаты радиоуглеродного датирования, которые укладываются в интервал 23–10 тыс. л. н. (Бадюкова, 2007; Свиточ, 2007; Arslanov et al., 2016; Makshaev and Svitoch, 2016). Близкие результаты также получены и уран-ториевым методом (Рычагов, 1997). Новые даты, полученные с применением ускорительной масс-спектрометрии (УМС) по образцам с различных участков каспийского побережья, указывают на то, что нижнехвалынские морские отложения формировались ~19–15 тыс. л. н. (Tudryn et al., 2016)<sup>1</sup>. Возрастные определения, полученные по раковинам и органическому веществу керн скважин акватории Северного Каспия, помещают время раннехвалынской трансгрессии в промежутки 36–18 тыс. л. н. (Yanina, 2020).

В последние годы получены новые массивы дат для отложений раннехвалынской стадии. Радиоуглеродные даты по Нижнему и Среднему Поволжью (Макшаев, Ткач, 2023; Makshaev and Svitoch, 2016; Zastrozhnov et al., 2020), акватории Северного Каспия (Безродных и др., 2017; Leroy et al., 2015), Западно-Туркменской низменности (Kurbanov et al., 2014) указывают на развитие трансгрессии в период 23–12 тыс. л. н. Датирование методом оптически-стимулированной люминесценции (ОСЛ) для Нижнего Поволжья (Butuzova et al., 2022; Kurbanov et al., 2021; Kurbanov et al., 2022;

<sup>1</sup> Здесь и далее указаны калиброванные даты.

Taratunina et al., 2022; Zastrozhnov et al., 2021; Zastrozhnov et al., 2020) дали несколько более молодой возраст: между 18–14 тыс. л. н. Для Манычской депрессии получены даты для нижнехвалынских осадков 17.7–14.9 тыс. л. н. (Семиколенных и др., 2022), отражающие время перетока вод из Каспия в Азово-Черноморский бассейн.

Несмотря на значительный прогресс в определении возраста различных этапов эволюции Каспийского моря в позднем плейстоцене, и многочисленные подтверждения “молодого” возраста раннехвалынских стадий, остается ряд нерешенных проблем палеогеографии региона: 1) ранг, возраст и масштабы трех стадий хвалыни; 2) наличие и хронология отдельных подстадий, которые фиксируются по выраженным в рельефе береговых линиям, отражающим этапы стабилизации уровня; 3) время образования хвалынского пролива в Манычской депрессии, характер его формирования и влияние на динамику уровня бассейна; 4) характер и стадийность развития береговых процессов во время трансгрессивного подъема уровня моря на участках глубоких эстуариев в долине Волги, Куры и Узбоя. Без решения этих принципиальных проблем, по-видимому, сложно будет продвинуться в понимании целого ряда других интересных вопросов в истории Каспийского моря: генезис и возраст бэровских бугров, источник воды для развития трансгрессий, корреляция с палеогеографическими событиями в соседних регионах и др. (Бадюкова, 2021).

Наиболее широко применяемая радиоуглеродная хронология ограничена необходимостью отбора органического материала, что зачастую позволяет датировать лишь те слои, где встречаются раковины каспийских моллюсков. В данном исследовании нами применено люминесцентное датирование высокой детальности для определения возраста нижнехвалынских отложений в надежде разрешить неопределенность относительно возраста ранней стадии хвалынской трансгрессии на примере Нижнего Поволжья. Новые данные существенно дополняют полученные ранее единичные даты для ряда разрезов региона (Kurbanov et al., 2021). Целью работы является разработка детальной хронологии развития трансгрессии на территории Нижнего Поволжья на основе применения люминесцентного датирования по материалам изучения трех опорных разрезов, расположенных вблизи г. Волгоград.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

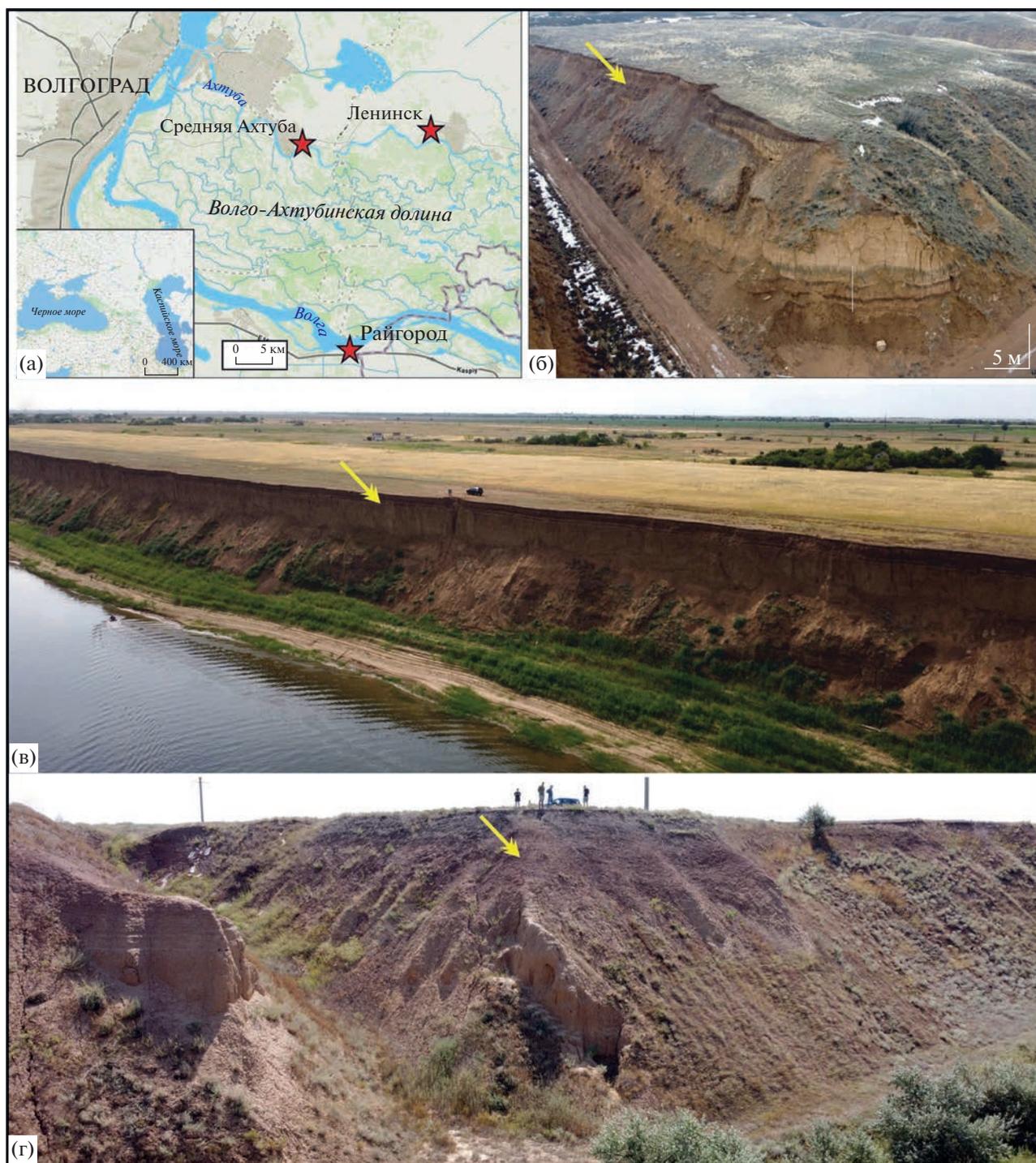
### *Объекты и район исследований*

Нижнее Поволжье расположено в пределах Прикаспийской низменности, простирающейся от возвышенности Общий Сырт на севере до бе-

регов Каспийского моря на юге. Абсолютные высоты низменности варьируют от –28 м на побережье Каспийского моря до 50 м в северной части региона. Рельеф представлен морской аккумулятивной равниной со следами эрозионных, суффозионных и эоловых процессов (Москвитин, 1962). В разрезах северной части Нижнего Поволжья нижнехвалынские отложения расположены между голоценовой почвой и ательской субаэральной свитой (Kurbanov et al., 2021). Они представлены легко идентифицируемыми глинами со специфическими характеристиками: кирпичный цвет, полосчатая текстура и многочисленные прослой алеврита толщиной менее 1 мм, что придает отложениям характерную “шоколадную” текстуру (Свиточ и Макшаев, 2015). В целом этот тип фаций в Прикаспийской низменности фиксируется в понижениях рельефа различных конфигураций и размеров, самой крупной из которых является долина Нижней Волги (Москвитин, 1962). Гипсометрическое положение хвалынских осадков в разрезах Поволжья изменчиво, они повторяют особенности палеорельефа.

Для отбора проб были выбраны три известных и детально исследованных разреза по обе стороны Волго-Ахтубинской долины вблизи г. Волгоград (рис. 1). Разрез Райгород (48.4313 с.ш., 44.9665 в.д., высота 13.68 м) является стратотипом ательской свиты Прикаспийской низменности. Здесь, на правом борту долины, горизонт шоколадных глин (ШГ) мощностью 1.7 м венчает разрез и с несогласием лежит на ательских лёссово-почвенных сериях (см. рис. 1в), общее строение разреза приведено в (Taratunina et al., 2022). Разрез Средняя Ахтуба расположен на правом борту долины южнее одноименного поселка (48.7004 с.ш., 44.8937 в.д., высота 14.89 м), подробное описание строения разреза приведено в (Янина и др., 2017; Taratunina et al., 2021), здесь представлены типичные ШГ общей мощностью 2.6 м (см. рис. 1б). В 20 км восточнее расположен разрез Ленинск (48.7213 с.ш., 45.1592 в.д., 11.45 м), где типичные ШГ имеют мощность около 3.7 м (Költringer et al., 2021b). Хвалынские осадки в этой части Нижнего Поволжья зажаты между ательскими лёссово-почвенными сериями и аллювиальными песками (снизу) и голоценовой каштановой почвой. В связи с тем, что в последних опубликованных работах по этим разрезам в основном обсуждаются результаты датирования ательской свиты (Kurbanov et al, 2022; Taratunina et al, 2022), нами выполнено обобщение результатов полевых исследований 2015–2020 гг. и люминесцентного датирования хвалынских отложений для уточнения хронологии хвалынской трансгрессии.

Для удобства чтения в статье используются следующие сокращения: СА – разрез Средняя Ахтуба; РГ – разрез Райгород; ЛН – разрез Ленинск; ШГ – шоколадные глины.



**Рис. 1.** Район исследования, расположение изученных разрезов (а) и общий вид обнажений в Средней Ахтубе (б), Райгороде (в) и Ленинке (г); стрелками указано положение горизонта шоколадных глин.

### *Люминесцентное датирование*

*Отбор образцов и пробоподготовка.* Во время полевых работ были отобраны пробы из трех описанных разрезов для люминесцентного датирования морских хвалынских отложений, подстилающих их лёссов и вышележащей почвы. В связи с

высокой плотностью отложений и невозможностью использования труб отбор проб производился ночью, когда в предварительно зачищенной стенке отбирались небольшие блоки осадка и помещались в непрозрачные пластиковые пакеты. Первичная пробоподготовка выполнена в Москве

в группе ОСЛ-датирования МГУ/ИГРАН по стандартной методике (Курбанов и др., 2021).

*Измерение эквивалентной дозы.* Измерения люминесценции были выполнены в Скандинавской лаборатории люминесцентного датирования в Рисо (Дания) по навескам зерен, установленным на дисках из нержавеющей стали, в ТЛ/ОСЛ ридере Riso TLDA-20, снабженным калиброванным бета-источником. Для измерения люминесцентного сигнала в кварце применялись большие (8 мм) аликвоты, для калиевых полевых шпатов использовали малые (2 мм) аликвоты. Чистота кварца была подтверждена отсутствием значительного сигнала, стимулированного инфракрасным излучением (IRSL). Измерения для различных партий образцов из разных разрезов выполнялись в разное время, результаты частично опубликованы, но при этом соблюдалось единство методики измерений, детально описанной в (Курбанов и др., 2019).

*Дозиметрия, расчет скорости накопления дозы.* Измерения концентрации радионуклидов выполнялись с помощью гамма-спектрометров высокого разрешения. Пробоподготовка выполнена по стандартной методике (Курбанов и др., 2021). Итоговая активность радионуклидов, обсуждение значений водонасыщения пород и скорости накопления дозы для образцов из каждого разреза приведены в специальных статьях (Янина и др., 2017; Kurbanov et al., 2022; Taratunina et al., 2022). В целом, ШГ отличаются высоким содержанием радионуклидов, что характерно для глинистых осадков.

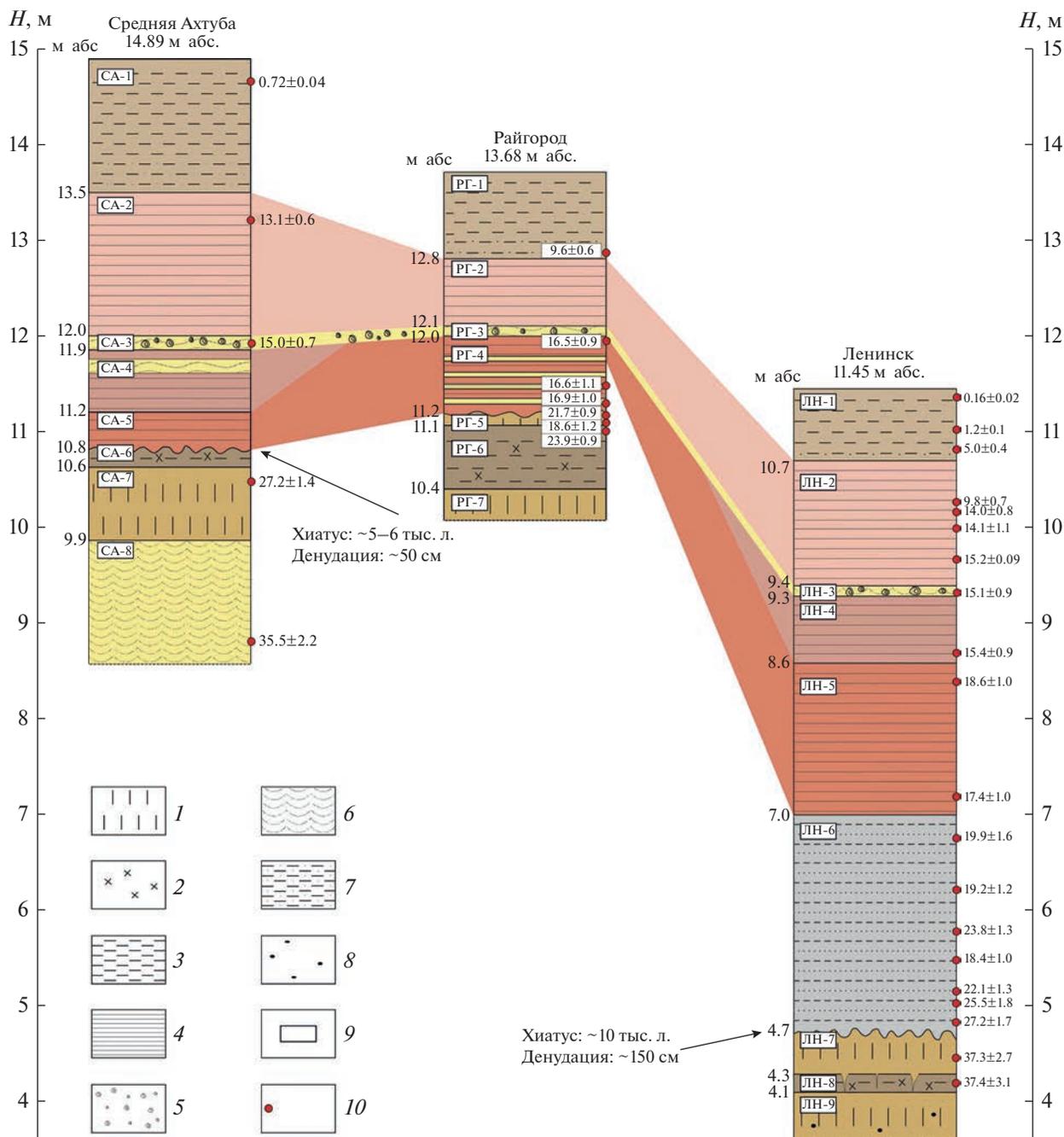
*Надежность хронологии.* Люминесцентное датирование выполнено на основе измерения сигнала по трем протоколам на основе SAR: ОСЛ для кварца, IR<sub>50</sub> и rIRIR<sub>290</sub> для калиевых полевых шпатов (КПШ). Данная методика позволяет выполнить сравнение датировок, оценить степень обнуления материала и, таким образом, говорить о надежности итоговой хронологии (Курбанов и др., 2019). Люминесцентный сигнал в кварцевых образцах характеризуется высокой чувствительностью, т.е. хорошо реагирует на стимуляцию светом, в нем преобладает быстрый компонент. Тест восстановления дозы был выполнен для шести аликвот каждого образца, и данные дозы варьировались от 4 до 100 Гр в зависимости от измеренной палеодозы каждого образца. Общие коэффициенты восстановления дозы близки к единице ( $1.01 \pm 0.03$ ,  $n = 96$ ), что говорит о том, что выбранный протокол способен точно измерить известную дозу, назначенную перед любой термической обработкой. Кривая затухания сигнала для полевых шпатов по протоколу rIRIR<sub>290</sub> имеет характерную форму (Taratunina et al., 2022). Образцам свойственна высокая чувствительность сигнала (коэффициент рециркуляции  $0.09 \pm 0.01$ ,

$n = 96$ ). Тест восстановления дозы проводился по 3 аликвотам каждого образца; задаваемые дозы варьировались от 50 до 100 Гр в зависимости от измеренной палеодозы каждого образца. Образцы КПШ предварительно обнулялись с использованием стимулятора солнечного света (48 часов), коэффициент восстановления дозы составляет  $1.04 \pm 0.03$  ( $n = 15$ ), что указывает на применимость протокола rIRIR<sub>290</sub> для точного измерения известной дозы перед любой термической обработкой. Дополнительные данные по люминесцентным характеристикам образцов каждого из разрезов, содержание радионуклидов и эквивалентные дозы приведены в специальных статьях (Янина и др., 2017; Kurbanov et al., 2022; Taratunina et al., 2022).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Строение хвалынских шоколадных глин*

В разрезе Средняя Ахтуба (СА) ШГ с размывом залегают на лёссово-почвенных сериях ательской свиты, кровля которых представлена сохранившейся нижней частью палеопочвы (слой СА-6, рис. 2). В строении ШГ выделяется три слоя. В основании залегают слой СА-5 с крупными уплощенными плитчатыми глинами и частыми тонкими прослоями алевролита 1–2 мм, мощность глиняных прослоев 0.5–2 см. В средней части слоя плитки толщиной 1.5–2 см имеют размеры до 30 см, поверхность волнистая, напоминает волновую рябь, с алевролитовым напылением, причем количество алевролита увеличивается в понижениях ряби (рис. 3а). В верхней части количество алевролитистых пропластов уменьшается, общая мощность слоя – около 40 см. Постепенно происходит переход к однородным ШГ (слой СА-4, 0.5 м), в которых отсутствуют пропласты алевролита. Особенность слоя – его однородность, отсутствие включений. При высыхании материал раскалывается на многочисленные вертикальные столбики размером 3–4 см. Выше по разрезу снова появляются пропласты алевролита, материал приобретает плитчатую отдельность, а затем появляются выраженные прослои алевролита мощностью до 1–2 см (слой СА-3), на глубине 2.95 м отмечается прослой с многочисленными раковинами каспийских моллюсков (Янина и др., 2017). Постепенно количество тонких пропластов алевролита увеличивается, мощность глинистых прослоев уменьшаются с 2–3 до 0.2 см, толщина приобретает ритмичное строение (слой СА-2), материал при высыхании раскалывается на характерные плитки (рис. 3б). Мощность слоя составляет ~1.5–1.6 м, переход в вышележащий суглинок в основании голоценовой каштановой почвы постепенный, граница выделяется условно по цвету и уменьшению выраженности плитчатого строе-

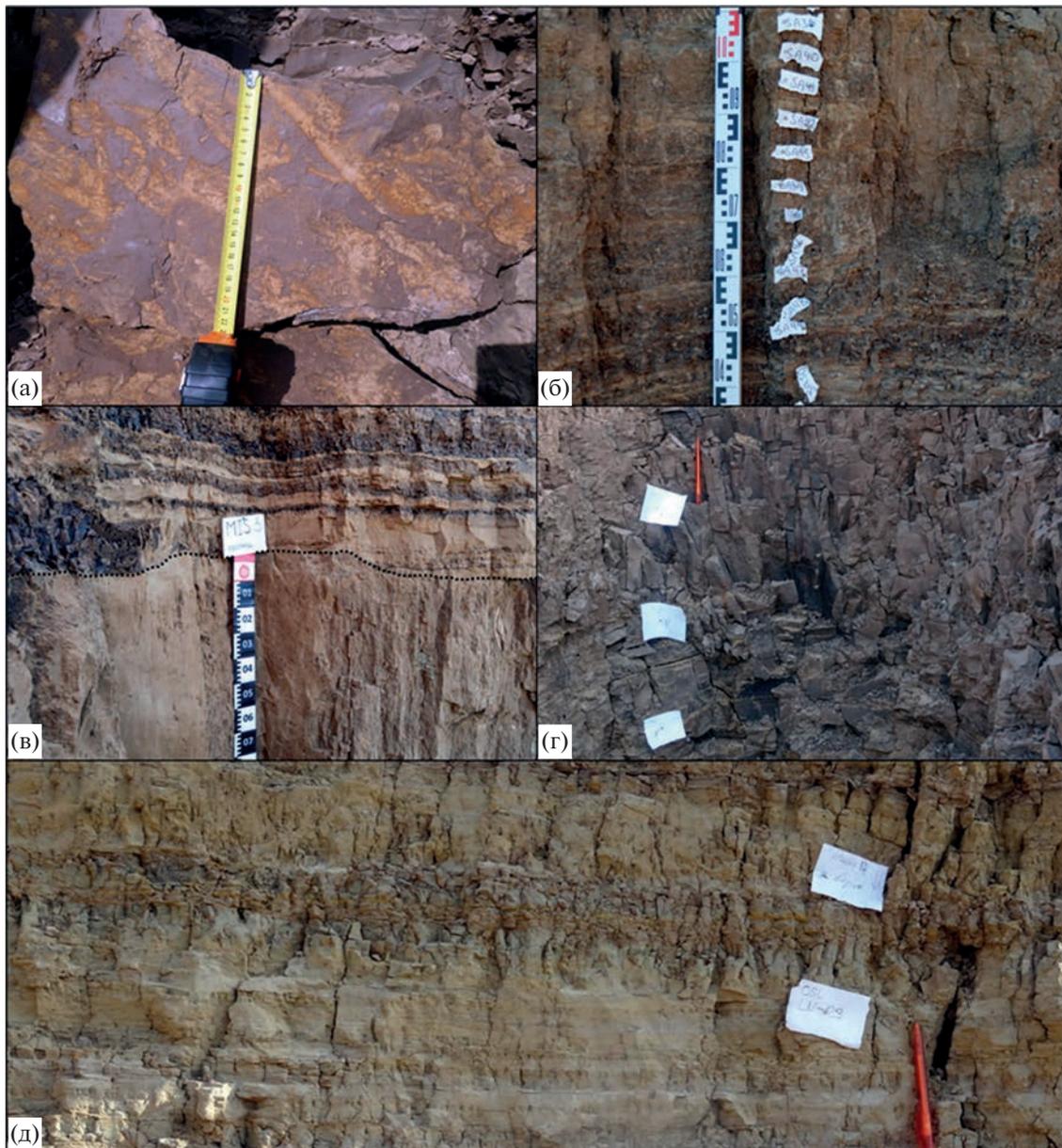


**Рис. 2.** Строение, литологическая характеристика изученных разрезов и результаты датирования. 1 – лёсс; 2 – палеопочва; 3 – суглинок; 4 – глина; 5 – малакофауна; 6 – песок; 7 – супесь; 8 – угли; 9 – литологические слои; 10 – ОСЛ-возраст, тыс. л. н.

*Примечание:* В литологических колонках цветом показан естественный цвет отложений, а цвет корреляций указывает на взаимоотношение различных подфаций шоколадных глин, отвечающих этапам развития трансгрессии – быстрого подъема уровня, максимального уровня, падения уровня. Для каждого разреза указано положение над уровнем моря (в Балтийской системе высот). Строение шоколадных глин и взаимоотношение слоев уточнено по сравнению с опубликованными первыми данными (Kurbanov et al., 2021).

ния. Таким образом, в СА выделяется три фации ШГ: (1) основание толщи представлено крупными уплощенными плитчатыми глинами, (2) средняя часть – однородными массивными глинами,

(3) верхняя – ритмичным переслаиванием алевритов и глин с мелкоплитчатой отдельностью, в низах с выраженными прослоями алевритов и тонких песков, обогащенных раковинами мол-



**Рис. 3.** Фациальные особенности шоколадных глин: (а) уплощенная плитка глин со следами ряби течения на гранях, Средняя Ахтуба, слой СА-5; (б) типичные ШГ в верхней части Средней Ахтубы с характерной плитчатой отдельностью, слой СА-2; (в) переслаивание суглинков, супесей и песков в основании ШГ разреза Райгород, слой РГ-4, выражена эрозионная граница в кровле ательских лёссов; (г) монолитные ШГ со столбчатой отдельностью в средней части Ленинск, слой ЛН-4; (д) переслаивание суглинков, супесей и мелкозернистых песков слоя ЛН-6.

люсков, переход к современной почве представлен сильнотрещиноватыми глинами, со следами почвенных процессов (Lebedeva et al., 2018).

В разрезе Райгород (РГ) ШГ также с размывом залегают на ательских лёссах, но имеют другой облик (см. рис. 2). В основании толщи представлен слой РГ-4 – переслаивание плитчатых глин и прослоев алеврита (рис. 3в), причем в основании слоя последние доминируют и имеют мощность от 2–3 до 5–10 см, отмечается примесь песка, мощность глинистых прослоев от 1 до 2–3 см. В

верхней половине слоя уже глины начинают доминировать, алеврит выражен в виде тонких пропластов, выделяются отдельные прослой мощностью до 1–2 см. В тонкопесчаных и алевритистых прослоях встречаются раковины каспийских моллюсков. Постепенно отмечается переход к коричневым глинам с мелкоплитчатой текстурой, сильно трещиноватым, без выраженных пропластов алеврита (слой РГ-2).

В литологических колонках цветом показан естественный цвет отложений, а цвет корреляций

указывает на взаимоотношение различных подфаций шоколадных глин, отвечающих этапам развития трансгрессии — быстрого подъема уровня, максимального уровня, падения уровня. Для каждого разреза указано положение над уровнем моря (в Балтийской системе высот). Строение шоколадных глин и взаимоотношение слоев уточнено по сравнению с опубликованными первыми данными (Kurbanov et al., 2021).

В разрезе Ленинск (ЛН) строение морских отложений в верхней части имеет сходное со Средней Ахтубой строение (см. рис. 2). Здесь в основании ШГ также залегает слой с крупными плитками (ЛН-5, 70 см), переходящий выше в монолитные глины (ЛН-4, 1.6 м, рис. 3г). На глубине 2.0–2.1 м выражен прослой алевритистого песка с фауной моллюсков (ЛН-3, 0.1 м). Венчает разрез ШГ слой с мелкоплитчатой структурой (ЛН-2, 1.2 м), постепенно переходящий в суглинок в основании современной каштановой почвы. При этом для ЛН отмечается более сложное строение хвалыньских отложений. Здесь ниже типичных ШГ выделяется слой горизонтально переслаивающихся прослоев глин, суглинков и мелкозернистых песков мощностью 2–3 см, серого цвета (рис. 3д); общая мощность слоя 2.3 м (ЛН-6). Встречается редкий раковинный детрит, недостаточный для видовых определений моллюсков. В самом основании слоя, над эрозионной границей с нижележащими ательскими лёссами, выделяется прослой песка мощностью до 0.5 см с отдельными мелкими обломками раковин моллюсков, в которых выделяются обломки характерные для рода *Didacna*. Эта фация хвалыни ранее не была описана в регионе.

Таким образом, в Райгороде и Средней Ахтубе ШГ подстилаются лёссово-почвенными сериями с явным эрозионным контактом. Нами выделено три подфации ШГ. 1. Плитчатая, с крупными уплощенными плитками глин и тонкими пропластами алеврита, редко встречается раковинный детрит. Текстурные особенности позволяют говорить о том, что эта подфация формировалась в условиях мелководного эстуария Волги с нестабильным уровнем и активным влиянием флювиальных процессов, которые выразились в многочисленных тонких пропластах алеврита. 2. Массивная плотная глина, розовато-коричневая, без видимых следов горизонтальной слоистости, в отложениях практически нет включений песчаных зерен и алеврита. Эта подфация формировалась в понижениях дохвалынского рельефа на дне глубокого хвалынского залива в Прикаспийской низменности. Однородность глин, отсутствие включений указывают на аккумуляцию в спокойных условиях, без участия флювиальных процессов. Из этой подфации было отобрано 10 образцов для датирования, однако ни в одном из них не удалось выделить зерен песчаной и алевритовой

размерности, что сделало люминесцентное датирование невозможным. 3. Сильнотрещиноватые глины, в основании с частыми прослоями алеврита и тонких песков, многочисленными раковинами и их обломками, в верхней части — со следами почвенных процессов. Учитывая строение отложений, наличие прослоев хорошо сортированного песка, видимых прослоев алеврита, эта подфация формировалась вблизи береговой линии, уровень бассейна был нестабильный, происходили частые фазы аккумуляции алеврита вследствие активизации флювиальных процессов. Песчаные прослои с раковинами моллюсков формировались на подводном береговом склоне. Здесь описана типичная хвалыньская фауна, в которую входят *Didacna protracta*, *D. ebersini*, *Dreissena rostriformis* и *Dr. polymorpha*. В Ленинске нижняя граница ШГ нечеткая, отмечается по увеличению мощности прослоев алеврита и песка, ослаблению характерного буровато-красного цвета. В разрезе представлена еще одна фация хвалыньских отложений — серые глины и супеси. Эта фация резко отличается от ШГ как по цвету, так и по структуре — нет характерной плитчатой отдельности. Формирование этой толщи происходило в резкодинамических условиях мелководного бассейна, когда в одни сезоны со стабильным уровнем формировались глины, в другие, маловодные, большее значение имел флювиальный фактор (суглинки), а близкое положение береговой линии отмечается в виде песчаных прослоев. В изученном районе хвалыньские отложения перекрыты современной каштановой почвой, образованной в результате почвенных процессов и биотурбации частично морских глин, частично эолового материала, поступавшего за голоцен.

#### *Люминесцентные характеристики отложений*

В общей сложности было получено 32 даты для разрезов Средняя Ахтуба, Райгород и Ленинск. Итоговые даты по кварцу и полевым шпатам, а также возрастные соотношения по двум протоколам  $IR_{50}$  и  $pIRIR_{290}$  к кварцу представлены в табл. 1.

В разрезе Ленинск был также отобран образец из слоя современного лёсса, наложенного на современную почву, для которого получен возраст по кварцу  $200 \pm 20$  лет, что свидетельствует о том, что, по крайней мере, эоловый кварц хорошо обнуляется в этом районе в настоящее время. В связи с тем, что современного аналога шоколадных глин не существует, степень обнуления сигнала должна оцениваться с использованием дифференциальных скоростей обнуления кварца и полевого шпата. В методическом исследовании (Murray et al., 2012) приводятся материалы сравнения трех сигналов (ОСЛ,  $IR_{50}$  и  $pIRIR_{290}$ ) для разных отложений. Доказано, что образцы, для которых возраст  $IR_{50} \leq$  возраста по кварцу — явля-

**Таблица 1.** Результаты люминесцентного датирования для кварца и полевых шпатов и их соотношения

Разрез	№	Лаб. №	Н, см	Слой в разрезе	Возраст, тыс. л. н.			Возрастные соотношения		Кварц достаточно засвечен
					Q	Fk, pIRIR <sub>290</sub>	Fk, IR <sub>50</sub>	pIRIR <sub>290</sub> /Q	IR <sub>50</sub> /Q	
ЛН	1	170801	5	ЛН-1	<b>0.16 ± 0.02</b>	0.23 ± 0.03	0.16 ± 0.02	1.0 ± 0.2	1.4 ± 0.2	✓
	2	170802	15	ЛН-1	<b>1.2 ± 0.1</b>	1.69 ± 0.09	1.16 ± 0.06	1.0 ± 0.1	1.5 ± 0.1	✓
	3	180801	55	ЛН-1	<b>5.0 ± 0.4</b>	6.6 ± 0.9	4.0 ± 0.7	0.79 ± 0.15	1.32 ± 0.20	✓
	4	180802	104	ЛН-2	<b>9.8 ± 0.7</b>	13.9 ± 1.2	7.5 ± 0.5	0.77 ± 0.08	1.43 ± 0.16	✓
	5	180803	114	ЛН-2	<b>14.0 ± 0.8</b>	16.0 ± 0.8	10.2 ± 0.5	0.73 ± 0.05	1.14 ± 0.08	✓
	6	180804	138	ЛН-2	<b>14.1 ± 1.1</b>			н/д		
	7	180805	178	ЛН-2	<b>15.2 ± 0.9</b>			н/д		
	8	170803	211	ЛН-3	<b>15.1 ± 0.9</b>	22.5 ± 1.2	19.5 ± 1.0	1.29 ± 0.10	1.49 ± 0.12	
	9	180806	240	ЛН-4	<b>15.4 ± 0.9</b>			н/д		
	10	170804	293	ЛН-5	<b>18.6 ± 1.0</b>	27.0 ± 1.5	19.3 ± 1.0	1.04 ± 0.08	1.46 ± 0.11	✓
	11	170805	445	ЛН-5	<b>17.4 ± 1.0</b>			н/д		
	12	180877	462	ЛН-6	<b>19.9 ± 1.6</b>	22.7 ± 1.7	14.9 ± 1.1	0.75 ± 0.08	1.14 ± 0.13	✓
	13	180807	515	ЛН-6	<b>19.2 ± 1.2</b>	21.2 ± 1.2	14.6 ± 0.7	0.76 ± 0.06	1.10 ± 0.09	✓
	14	180878	575	ЛН-6	<b>23.8 ± 1.3</b>	22.9 ± 1.0	12.0 ± 0.5	0.51 ± 0.03	0.96 ± 0.07	✓
	15	180808	593	ЛН-6	<b>18.4 ± 1.0</b>	20.5 ± 1.1	13.3 ± 0.6	0.72 ± 0.05	1.11 ± 0.09	✓
	16	170806	623	ЛН-6	<b>22.1 ± 1.3</b>	38.0 ± 1.7	26.2 ± 1.1	1.18 ± 0.09	1.72 ± 0.13	✓
	17	180879	649	ЛН-6	<b>25.5 ± 1.8</b>	25.6 ± 1.6	14.4 ± 1.2	0.56 ± 0.06	1.00 ± 0.09	✓
	18	180809	666	ЛН-6	<b>27.2 ± 1.7</b>	32.6 ± 4.1	23.8 ± 3.0	0.88 ± 0.12	1.20 ± 0.17	✓
	19	180881	673	ЛН-7	<b>37.3 ± 2.7</b>	40.2 ± 3.0	22.8 ± 2.0	0.87 ± 0.09	1.54 ± 0.15	✓
	РГ	20	170807	727	ЛН-8	<b>37.4 ± 3.1</b>	44.3 ± 3.6	26.0 ± 2.3	0.70 ± 0.08	1.18 ± 0.14
21		160801	80	РГ-1	<b>9.6 ± 0.6</b>	12.3 ± 0.8	8.1 ± 1.0	1.3 ± 0.1	0.8 ± 0.1	
22		160803	172	РГ-3	<b>16.5 ± 0.9</b>	17.9 ± 1.0	14.0 ± 1.9	1.1 ± 0.1	0.8 ± 0.1	✓
23		160804	196	РГ-4	<b>16.6 ± 1.1</b>	19.0 ± 0.9	11.2 ± 1.6	1.1 ± 0.1	0.7 ± 0.1	✓
24		160805	238	РГ-4	<b>16.9 ± 1.0</b>	17.3 ± 0.9	10.9 ± 1.3	1.0 ± 0.1	0.6 ± 0.1	✓
25		177741	256	РГ-5	<b>21.7 ± 0.9</b>	25.5 ± 1.0	н/д	1.2 ± 0.1	н/д	
26		160806	261	РГ-5	<b>18.6 ± 1.2</b>	20.0 ± 0.9	13.7 ± 1.7	1.1 ± 0.1	0.7 ± 0.1	✓
27		177742	266	РГ-6	<b>23.9 ± 0.9</b>	26.1 ± 0.9	н/д	1.1 ± 0.1	н/д	✓
СА	28	150501	40	СА-1	<b>0.72 ± 0.04</b>			н/д		
	29	150806	315	СА-2	<b>13.1 ± 0.6</b>			н/д		
	30	150807	450	СА-3	<b>15.0 ± 1.0</b>			н/д		
	31	150809	440	СА-7	<b>27.2 ± 1.4</b>			н/д		
	32	150810	592	СА-6	<b>35.5 ± 2.2</b>			н/д		

*Примечание.* Н – глубина отбора; Q – измерения по кварцу; Fk – калиевые полевые шпаты; pIRIR<sub>290</sub> – инфракрасно стимулированная люминесценция с измерением при нагреве до 290°C.

ются “вероятно обнуленными” в ходе геологического транспорта, а те, для которых соотношение pIRIR<sub>290</sub>/ОСЛ ≤ 1.3, считаются “хорошо обнуленными”. Исходя из этих критериев, из 22 образцов, для которых получены оценки возраста по кварцу и по КПШ – 20 являются хорошо обнуленными. В остальных 4 образцах сигнал является “вероятно обнуленным”. Таким образом, для полученной хронологии образцы кварца были достаточно обнулены перед формированием осадка, и неопределенности, связанные с проблемой обнуле-

ния (и, таким образом, удревнения ОСЛ-возраста) не вносят существенного вклада в достоверность итоговых датировок. Хорошая сходимости большого количества измеренных аликвот для каждого образца, результаты стандартных тестов (восстановления дозы, температурного плато) указывают на высокую надежность полученной ОСЛ-хронологии для хвалыньских отложений Нижнего Поволжья.

Люминесцентные характеристики образцов, соотношения датировок по кварцу и КПШ, выво-

ды об обнулении сигнала могут косвенно указывать на условия осадконакопления. Так, изученные нами лёссовые отложения ательской свиты образовались в результате эолового привноса материала, что предполагает длительное воздействие дневного света (Költringer et al., 2021a). Морские отложения, представленные в разрезах, судя по характеристике слоистости и размеру зерен, были образованы в спокойной (малодинамичной) обстановке и поэтому могли не иметь возможности для воздействия солнечного света после попадания в Каспийское море. Несмотря на это, даже сигнал  $pIRIR_{290}$  в КПШ почти полностью обнулен, хотя для этого требуется достаточно длительное воздействие света. Материал, формирующий отложения в северной части Каспийского моря, почти полностью поставляется Волгой, которая дренирует Восточно-Европейскую равнину, покрытую средне- и верхнечетвертичными моренами, то есть переносит вещество из Скандинавии и Уральских гор (Költringer et al., 2022; Tudryn et al., 2016). Таким образом, большая часть мелкозернистого и илистого материала переносилась на значительные расстояния и, вероятно, многократно перерабатывалась в водном потоке до окончательного осаждения, т.е. представляется весьма вероятным, что материал, слагающий морские каспийские отложения в изученных разрезах, был обнулен в момент осадконакопления.

#### Результаты датирования

Для нижнехвалынских отложений всего получено 32 даты (см. табл. 1). В разрезе Средняя Ахтуба из прослоя песков с хвалынскими раковинами *Didacna protracta* и *D. ebersini* (слой 3) получена дата  $15.0 \pm 0.7$  тыс. л. н. Образец выше (слой СА-2) охарактеризован возрастом  $13.1 \pm 0.6$  тыс. л. н. Возраст современной каштановой почвы определен по образцу из горизонта А и составляет  $0.72 \pm 0.04$  тыс. л. н. Шоколадные глины с размывом залегают на горизонте лёсса. Здесь отмечается размыв палеопочвы, в разрезе сохранена лишь нижняя часть профиля. Этот интересный факт не позволяет точно определить мощность размыва в ходе трансгрессии, так как над размывтой почвой мог располагаться горизонт лёсса, однако исходя из особенностей строения профиля почвы, можно оценить размыв как минимум 30 см (Makeev et al., 2021). По-видимому, мощность размыва была существенно больше, так как дата определяет возраст палеопочвы в 10 см ниже границы размыва в  $27.2 \pm 1.4$  тыс. л. н.

В Райгороде нижняя часть хвалынских отложений (слой РГ-4) охарактеризована тремя датами, которые дают близкие значения около 16–17 тыс. л. н. Возраст основания каштановой почвы  $9.6 \pm 0.6$  тыс. л. н. может быть не совсем точным. Для этого образца (160801) соотношение

$pIRIR_{290}/Q$  равно 1.3, что указывает на то, что кварц, по-видимому, был достаточно обнулен. Однако осадок в основании почвы представляет собой смесь биотурбированной морской глины и лёссового материала, что не позволяет исключить возможность переработки компонента морской глины таким образом, что в большей степени сохранилась палеодога предыдущего цикла. Этот осадок, однако, был хорошо перемешан с поступавшим сверху лёссовым материалом, в результате чего итоговый возраст оказался моложе нижележащих морских глин. Для верхней части лёссов (слой 5) получено три даты, одна из которых ( $18.6 \pm 1.2$ ) выбивается, при этом все три даты пересекаются с учетом доверительных интервалов. Отмечается хиатус между основанием ШГ ( $16.9 \pm 1.0$ ) и верхом лёссов ( $21.7 \pm 0.9$ ), который составил ~5 тыс. л.

Типичные ШГ в разрезе Ленинск (слои 2–5) имеют возраст от  $17.4 \pm 1.0$  (170805) до  $14.0 \pm 0.8$  тыс. л. н. (180803), что хорошо согласуется с данными из Райгорода и Средней Ахтубы. Дата из самого верха слоя ЛН-2  $9.8 \pm 0.7$  тыс. л. н. на границе с суглинком современной почвы является, на наш взгляд, омоложенной в результате биотурбации. Особый интерес представляет возраст нижележащей толщи горизонтально-слоистых серых глин и песков (слой ЛН-6). Полученные шесть датировок позволяют оценить время формирования этой толщи в период 27.2–19.9 тыс. л. н. Здесь отмечается наличие одной явной инверсии (180808), в то же время верхний образец (180878), по-видимому, также несколько удревлен. Это связано, как уже было указано выше, со сложностью оценки мощности бета-дозы и занижением ее в результате отбора проб из слоистых отложений, когда мощность прослев составляет 2–3 см. Два образца из подстилающих лёссов и палеопочвы (слои ЛН-7 и ЛН-8) имеют возраст  $37.2 \pm 2.7$  и  $37.4 \pm 3.1$  тыс. л. н. Наконец, горизонт А современной каштановой почвы имеет возраст  $1.2 \pm 0.1$  тыс. л. н., а на глубине 55 см –  $5.0 \pm 0.4$  тыс. л. н.

Таким образом, нижнехвалынские отложения в изученных разрезах представлены пачкой прибрежно-морских осадков (слой ЛН-6) и горизонтом шоколадных глин. Переслаивающиеся супеси и суглинки в основании хвалынских отложений формировались в период 27.2–19.9 тыс. л. н. Возраст шоколадных глин в изученных разрезах составил: 16.9–16.5 (Райгород), 15.0–13.1 (Средняя Ахтуба), 15.3–12.5 (Ленинск) тыс. л. н. Согласие результатов ОСЛ с данными радиоуглеродного анализа, высокая сходимость возрастов по кварцу и полевым шпатам, соответствие результатов внутренних тестов принятым в люминесцентном датировании стандартам указывают на высокую достоверность полученной хронологии.

Новые данные о строении ШГ и детальное датирование отложений позволяет по-новому взглянуть на хронологию этапов развития хвалынской трансгрессии. Учет гипсометрического положения отдельных подфаций внутри толщи ШГ позволяет приблизительно реконструировать уровень моря во время их формирования. Несмотря на то, что здесь нет слоев, которые можно было бы уверенно соотносить с фациями, которые формируются вблизи береговой линии (пляжевые пески, береговые валы и др.), особенности формирования ШГ глин, тем не менее, позволяют судить об уровне моря во время их накопления. Так, само наличие осадка на определенном гипсометрическом уровне при наличии дат из этого слоя, позволяет говорить о том, что каспийские воды уже достигли этой высоты, и уровень бассейна был не ниже зафиксированных отметок. Так, к примеру, в Ленинске отмечается смена условий седиментации с субаэральных на субаквальные ~27 тыс. л. н., что указывает на то, что уровень моря уже достиг отметки 4.7 м абс. в это время. Другим косвенным показателем положения береговой линии являются хиатусы, которые выделяются в верхней части лёссов в Ленинске и Средней Ахтубе. Разница в датах из кровли лёссов и подошвы ШГ позволяет оценить временной промежуток лёссонакопления, размытого в результате береговых процессов. Причем, по-видимому, на тех участках, где береговая линия располагалась дольше, с характерными для Каспия незначительными годовыми колебаниями уровня, мощность размыта субаэральных отложений должна быть большей.

#### *Этапы развития хвалынской трансгрессии в Нижнем Поволжье*

Результаты датирования подтверждают имеющиеся данные об относительно молодом (27–14 тыс. л. н.) возрасте трансгрессивной стадии раннехвалынской эпохи, когда слои глин в северной части Нижнего Поволжья откладывались в прибрежно-морских условиях и на подводном береговом склоне обширного хвалынского бассейна. Уточнение строения хвалынских отложений в изученных разрезах, выделение четырех фаций ШГ, новые результаты люминесцентного датирования (см. рис. 3) позволяют более детально реконструировать историю развития раннехвалынской трансгрессии в северной части Нижнего Поволжья и выделить ряд этапов.

1. Этап первоначального проникновения каспийских вод в район Ленинска. Выражен основанием горизонта прибрежно-морских суглинков и песков серого цвета (слой ЛН-6). Береговая линия достигла Ленинска около 27 тыс. л. н. на абс. высоте ~5 м. В Средней Ахтубе этот этап подъема уровня отражен в виде прослоев аллювиального песка (слой СА-8) – результата меандрирования

русел в образовавшейся новой дельте из-за подпора морскими водами около 30–35 тыс. л. н. (Янина и др., 2017). В Ленинске при первоначальном проникновении каспийских вод произошел размыв верхней части лёссово-почвенных серий. В основании хвалынской толщи Ленинска получена дата  $27.2 \pm 1.7$  тыс. л. н., в то время как для верхов ательского лёсса –  $37.3 \pm 2.7$ , что указывает на хиатус ~10 тыс. л. н. Полученные ранее детальные данные о времени формирования ательских отложений этого разреза (Kurbanov et al., 2022) позволяют оценить скорость лёссонакопления в МИС 3 в ~15 см/тыс. л., и, таким образом, оценить мощность размыта не менее ~150 см. В это время, по-видимому, подъем уровня моря был незначительным по скорости, происходило постепенное затопление поверхности, сопровождавшееся активизацией береговых процессов и абразии легкоразмываемых лёссовидных суглинков.

2. Этап стабилизации уровня хвалынского бассейна с незначительным его подъемом не менее чем на 2.3 м (с ~5 до 7 м абс.) за 6.6 тыс. л. (27.2–19.9 тыс. л. н.). В это время формировались серые суглинки и пески в Ленинске (ЛН-6). Строение отложений, их гипсометрическое положение и возраст указывают на формирование этой фации хвалынских отложений в условиях первоначального проникновения вод в северную часть Нижнего Поволжья: переслаивание выраженных прослоев суглинков, глин и песков отражает значительную динамику условий осадконакопления, которая зависела от степени активности флювиальных и береговых процессов. Особенности строения толщи позволяют реконструировать прибрежно-морские условия, в это время береговая линия располагалась вблизи разреза, а условия седиментации испытывали частую смену от лиманно-морских (формируются прослой глин) до устьевых (супесь и косослоистый тонкий песок). Этапы активного влияния Волги в районе расположения береговой линии раннехвалынского бассейна отразились в прослоях, обогащенных песчаным материалом, в то время как глинистые прослои отражают более спокойные условия подводного берегового склона мелководного эстуария. Уровень бассейна был нестабильный, с частыми колебаниями, но общей тенденцией к росту. Эта фация хвалынских отложений представлена только в расположенном на более низком гипсометрическом уровне Ленинске, здесь переход в вышележащие шоколадные глины постепенный, однако отмечается граница перехода на глубине ~7.0 м.

3. Этап резкого подъема уровня раннехвалынского бассейна. Основание ШГ отражает резкий подъем уровня моря, когда в его начальные фазы формировались фации, содержащие большое количество прослоев песка и алевролита (слой РГ-4 в Райгороде, СА-5 в Средней Ахтубе и ЛН-5 в Ленинске). В ходе перемещения береговой линии

произошел размыв ательских лёссово-почвенных серий в разрезах Средняя Ахтуба и Райгород. При достижении Райгорода береговая линия смешалась с большой скоростью, без промежутков стабилизации уровня, что, по-видимому, не позволило волновым процессам осуществить значительный размыв поверхности затапливаемой равнины, об этом свидетельствует близость датировок из основания шоколадных глин ( $16.9 \pm 1.0$ ) и кровли лёссов ( $18.6 \pm 1.2$ ) в этом разрезе. В Средней Ахтубе размыв был более значительный, однако из-за отсутствия дат в основании слоя СА-5 нет возможности определить разницу в возрасте. Результаты датирования высокого разрешения в Средней Ахтубе (Hojsager, 2019) указывают на хиатус около 5–6 тыс. л., что, с учетом скорости осадконакопления  $\sim 10$  см/тыс. л., позволяет реконструировать размыв поверхности ательских лёссов в  $\sim 50$  см. Начало этого стремительного подъема уровня моря с 7.0 м абс. отмечается в районе 17 тыс. л. н. (переход от слоев ЛН-6 к ЛН-5). Учитывая наличие хиатуса в Средней Ахтубе, где ШГ начали формироваться на более низком уровне 10.8 м абс., и его отсутствие в Райгороде, где подошва ШГ фиксируется на высоте 11.2 м абс., можно говорить о нарастающих скоростях подъема уровня моря: в Средней Ахтубе береговая линия в это время сохранялась дольше, что выразилось в более значительном размыве лёссовых пород.

4. Этап максимального подъема уровня раннехвалынского бассейна. Скорость подъема уровня моря увеличилась в период около 15.8–15.0 тыс. л. н. Стремительный подъем и перемещение береговой линии далее на север от изученных разрезов, когда увеличение глубины бассейна выразилось в прекращении поступления песчаных частиц и алеврита. В понижениях дохвалынского рельефа в это время активно формировались монотонные глины (слои ЛН-4 и СА-4, в Райгороде не выражены, видимо из-за более высокого гипсометрического положения этого участка). Эти отложения в средней части шоколадных глин отражают этап наибольшего распространения хвалынского бассейна, когда, в соответствии с классическими представлениями о максимальном уровне моря (Рычагов, 1997; Свиточ, 2014), береговая линия достигла 45–50 м абс. Таким образом, средняя часть шоколадных глин в изученных разрезах формировалась, когда глубина воды в эстуарии Волги составляла около  $\sim 36$  м (Ленинск, положение слоя ЛН-4 на высотах 8.6–9.3 м абс.) и  $\sim 35$  м (Средняя Ахтуба, положение слоя СА-5 на высотах 10.8–11.2 м абс.) в интервале времени около 15.8–15.0 тыс. л. н., на этапе максимального подъема уровня хвалынского бассейна.

5. Этап снижения уровня –  $\sim 15$ –14 тыс. л. н. Верхняя часть ШГ, представленная фацией ритмичного переслаивания глин и тончайших про-

пластов алеврита, отражает снижение уровня раннехвалынского бассейна. В изученных обнажениях активная фаза падения уровня фиксируется появлением песчаных прослоев с раковинами моллюсков, это указывает на две различные по характеру фазы деградации бассейна. Согласно полученной хронологии, первая фаза проходила стремительно, с высокими скоростями падения уровня моря и перемещения береговой линии на юг – в изученных разрезах это фиксируется по увеличению поступления песка и алеврита. Завершение этой фазы отмечается по самому нижнему прослою с морской фауной в Ленинске (9.4 м абс.). В дальнейшем накопление верхней части шоколадных глин происходило уже в условиях опресненного эстуария и контролировалось Волгой, что выразилось в характерной ритмичности осадка. Глубина этого эстуарного бассейна постепенно снижалась. Дата  $13.1 \pm 0.6$  тыс. л. из верхней части слоя СА-2, скорее всего, является несколько омоложенной (возможно из-за влияния биотурбации и привноса более молодого материала из вышележащего слоя), как и дата  $9.8 \pm 0.7$  тыс. л. из верхов слоя ЛН-2. Таким образом, окончательный уход хвалынских вод из северной части Нижнего Поволжья произошел около 14 тыс. л. н. (чуть позднее  $14.0 \pm 0.8$  тыс. л. н. – самой даты по ШГ в разрезе Ленинск на высоте 10.3 м абс.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение хвалынских отложений в трех разрезах Нижнего Поволжья позволило разработать первую для Каспийского региона детальную абсолютную хронологию, характеризующую отдельные фазы развития раннехвалынской трансгрессии. В исследованных разрезах впервые выделено три фации шоколадных глин, которые формировались в весьма специфических палеогеографических условиях: в Прикаспийской низменности развивался обширный залив, с глубоким эстуарием по долине Волги, где, в зависимости от положения береговой линии, доминировали, сменяя друг друга, флювиальные и береговые процессы. Учет этих особенностей региона, палеогеоморфологического положения разрезов, деталей строения толщ, позволил определить характер осадконакопления для каждой из выделенных фаций хвалынских отложений. Выделены слои: (1) формировавшиеся в условиях первоначального проникновения хвалынских вод в северную часть Нижнего Поволжья, (2) в период начала активного подъема уровня моря, (3) в момент максимального распространения бассейна и (4) в этап падения уровня моря и отступления береговой линии.

ОСЛ-датирование позволило реконструировать время первоначального проникновения каспийских вод в район Ленинска  $\sim 27$  тыс. л. н.,

когда морские воды достигли ~5 м абс. В период 27–20 тыс. л. н. отмечается относительная стабилизация и незначительный подъем уровня с ~5 до 7 м абс., т.е. за ~6.6 тыс. л. произошел подъем уровня бассейна не менее чем на 2 м. Около 17 тыс. л. н. начинается период активного подъема уровня, а в период 16–15 тыс. л. н. происходит стремительный подъем, в это время раннехвалынский бассейн должен был достигнуть максимальных размеров, а береговая линия переместилась далеко на север до уровня ~45–50 м абс. (согласно классическим представлениям). С 15 тыс. л. н. в раннехвалынском бассейне начинается регрессивная тенденция, и в период 15–14 тыс. л. н. уровень моря падает с максимальных значений до ~11 м абс.

Детальное ОСЛ-датирование хвалынских осадков и подстилающих их субаэральных отложений ательской свиты впервые позволило выявить наличие и продолжительность hiatus в позднплейстоценовой летописи Нижнего Поволжья. Так, в верхней части лёссово-почвенных серий в Ленинске выделен hiatus ~10 тыс. л., в разрезе Средняя Ахтуба отмечается hiatus около 5–6 тыс. л.

Учет скоростей лёссонакопления для каждого из разрезов позволил впервые определить масштаб денудации при затоплении хвалынскими водами территории Прикаспийской низменности. Так, в Ленинске мощность размыва составила ~150 см, а в Средней Ахтубе денудацией была затронута верхняя часть ательских лёссов мощностью ~50 см. Эти данные, совместно с анализом распределения датировок, позволили уточнить характер и длительность абразионных процессов на берегах раннехвалынского моря, и косвенно говорить о длительности расположения береговой линии в отдельные периоды развития трансгрессии.

Корреляция выделенных этапов развития раннехвалынской трансгрессии с разработанной ранее стадийной историей хвалынского бассейна (Рычагов, 1997) может быть выполнена после получения новых данных о возрасте хвалынских отложений в пределах каспийского побережья в Туркменистане, Азербайджане и Дагестане. Молодой (15.8–15.0 тыс. л. н.) возраст максимальной фазы крупнейшей позднечетвертичной трансгрессии Каспия в настоящее время служит основой для дальнейших палеогеографических исследований, в том числе выявления причин, механизмов и последствий такого экстремального повышения уровня моря (с ~7 до ~45–50 м абс.) за время около 1 тыс. л.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда: проекты № 16-17-10103 (поле-

вые работы в 2016 и 2017 гг.), № 17-77-10134 (полевые работы в 2018 г. и аналитические исследования) и № 19-77-10077 (абсолютное датирование).

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны анонимным рецензентам за ценные замечания, А.С. Murray, J.-P. Buylaert, W. Tompson за помощь в получении датировок, А.В. Панину, М.П. Лебедевой и Е.Н. Бадюковой за обсуждение результатов датирования и рекомендации.

#### FUNDING

This study was supported by the Russian Science Foundation, projects nos. 16-17-10103 (field work in 2016 and 2017), 17-77-10134 (field work in 2018 and analytical studies) and 19-77-10077 (absolute dating).

#### ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to A.S. Murray, J.-P. Buylaert, W. Tompson for help during luminescence dating, A.V. Panin, M.P. Lebedeva, and E.N. Badyukova for discussion of dating results and valuable recommendations.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андрусов Н.И.* О геологических исследованиях в Закаспийской области, произведенных в 1887 г. // Тр. Арало-Касп. экспед. 1889. Вып. 6.
- Бадюкова Е.Н.* Возраст хвалынских трансгрессий Каспийского моря // Океанология. 2007. Т. 47. № 3. С. 432–438.
- Бадюкова Е.Н.* Колебания уровня Каспийского моря в неоплейстоцене (была ли ательская регрессия?) // Океанология. 2021. № 61. С. 320–329.
- Безродных Ю.П., Романюк Б.Ф., Сорокин В.М., Янина Т.А.* Первые данные о радиоуглеродном возрасте ательских отложений Северного Каспия // ДАН. 2017. Т. 473. № 3. С. 327–330.
- Курбанов Р.Н., Ульянов В.А., Анойкин А.А., Павленок Г.Д., Семиколенных Д.В., Харевич В.М., Таймагамбетов Ж.К., Мюррей Э.С.* Первая люминесцентная хронология начального верхнего палеолита Восточного Казахстана (по материалам стоянки Ушбулак) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 5. С. 131–148.
- Курбанов Р.Н., Янина Т.А., Мюррей А.С., Семиколенных Д.В., Свистунов М.И., Штыркова Е.И.* Возраст Карангатской трансгрессии (поздний плейстоцен) Черного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2019. № 6. С. 29–39.
- Лаврушин Ю.А., Спиридонова Е.А., Тудрин А., Шали Ф., Антипов М.П., Кураленко Н.П., Курина Е.Е., Тухолка П.* Каспий: гидрологические события позднего квартала // Бюлл. Комиссии по изучению четвертич. периода. 2014. Вып. 73. С. 19–51.

- Макишев Р.Р., Ткач Н.Т.* Хронология хвалынского этапа развития Каспия по данным радиоуглеродного датирования // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54. № 1. С. 37–54.  
<https://doi.org/10.31857/S0435428123010108>
- Москвитин А.И.* Плейстоцен Нижнего Поволжья // Труды ГИН АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Вып. 64. 263 с.
- Рычагов Г.И.* Плейстоценовая история Каспийского моря. М.: Изд-во МГУ, 1997. 267 с.
- Рычагов Г.И.* Хвалынский этап в истории Каспийского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 4. С. 3–9.
- Свиточ А.А.* Большой Каспий: строение и история развития. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2014. 272 с.
- Свиточ А.А.* О природе хвалынской трансгрессии Каспия // Океанология. 2007. Т. 47. № 2. С. 304–311.
- Семиколенных Д.В., Курбанов Р.Н., Янина Т.А.* Возраст хвалынского пролива в позднеплейстоценовой истории Манычской депрессии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2022. № 5. С. 103–112.
- Федоров П.В.* Плейстоцен Понто-Каспия. М.: Наука, 1978. 163 с.
- Шаховец С.А.* Хронология палеогеографических событий позднего плейстоцена Нижней Волги (по данным термолюминесцентного метода): Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1987. 24 с.
- Янина Т.А., Свиточ А.А., Курбанов Р.Н., Мюррей Э.С., Ткач Н.Т., Сычев Н.В.* Опыт датирования плейстоценовых отложений Нижнего Поволжья методом оптически стимулированной // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 1. С. 21–29.
- Arslanov Kh.A., Yanina T.A., Chepalyga A.L., Svitoch A.A., Makshaev R.R., Maksimov F.E., Chernov S.B., Tertychniy N.I., Starikova A.A.* On the age of the Khvalynian deposits of the Caspian Sea coasts according to  $^{14}\text{C}$  and  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  methods // Quat. Int. 2016. Vol. 409. Part A. P. 81–87.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.05.067>
- Butuzova E.A., Kurbanov R.N., Taratunina N.A., Makeev A.O., Rusakov A.V., Lebedeva M.P., Murray A.S., Yanina T.A.* Shedding light on the timing of the largest Late Quaternary transgression of the Caspian Sea // Quat. Geochronology. 2022. Vol. 73.  
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101378>
- Højsager P.* High-resolution optically stimulated luminescence dating at the type section Srednyaya Akhtuba, Russia. Master Thesis. Aarhus: Aarhus Univ., Dep. of Geosci., 2019. 100 p.
- Költringer C., Bradák B., Stevens T., Almqvist B., Banak A., Linder M., Kurbanov R., Snowball I. et al.* Paleoenvironmental implications from Lower Volga loess – Joint magnetic fabric and multi-proxy analyses // Quat. Sci. Rev. 2021. Vol. 267.  
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107057>
- Költringer C., Stevens T., Bradák B., Almqvist B., Kurbanov R., Snowball I., Yarovaya S.* Environmental evolution in Lower Volga loess sequences, Russia // Quat. Res. 2021. Vol. 103. P. 49–73.  
<https://doi.org/10.1017/qua.2020.73>
- Költringer C., Stevens T., Lindner M., Baykal Y., Ghafarpour A., Khormali F., Taratunina N., Kurbanov R.* Quaternary sediment sources and loess transport pathways in the Black Sea–Caspian Sea region identified by detrital zircon U–Pb geochronology // Global and Planetary Change. 2022. Vol. 209.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103736>
- Kurbanov R.N., Buylaert J.-P., Stevens T., Taratunina N.A., Belyaev V.R., Makeev A.O., Lebedeva M.P., Rusakov A.V., Solodovnikov D., Költringer C., Rogov V.V., Streletskaya I.D., Murray A.S., Yanina T.A.* A detailed luminescence chronology of the Lower Volga loess-palaeosol sequence at Leninsk // Quat. Geoch. 2022. Vol. 73.  
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101376>
- Kurbanov R., Murray A., Thompson W., Svistunov M., Taratunina N., Yanina T.* First reliable chronology for the early Khvalynian Caspian Sea transgression in the Lower Volga River valley // Boreas. 2021. Vol. 50. № 1. P. 134–146.  
<https://doi.org/10.1111/bor.12478>
- Kurbanov R.N., Svitoch A.A., Yanina T.A.* New data on marine Pleistocene stratigraphy of the Western Cheleken peninsula // Doklady Earth Sci. 2014. Vol. 459. P. 1623–1626.
- Lebedeva M., Makeev A., Rusakov A., Romanis T., Yanina T., Kurbanov R., Kust P., Varlamov E.* Landscape dynamics in the Caspian Lowlands since the last deglaciation reconstructed from the pedosedimentary sequence of Srednyaya Akhtuba, southern Russia // Geosciences. 2018. Vol. 8. № 492. P. 1–21.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences8120492>
- Leroy S.A.G., Tudryn A., Chalié F., López-Merino L., Gasse F.* From the Allerød to the mid-Holocene: palynological evidence from the south basin of the Caspian Sea // Quat. Sci. Rev. 2015. Vol. 78. P. 77–97.
- Makeev A., Lebedeva M., Kaganova A., Rusakov A., Kust P., Romanis T., Yanina T., Kurbanov R.* Pedosedimentary environments in the Caspian Lowland during MIS5 (Srednyaya Akhtuba reference section, Russia) // Quat. Int. 2021. Vol. 590. P. 164–180.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.03.015>
- Makshaev R.R., Svitoch A.A.* Chocolate clays of the northern Caspian Sea region: distribution, structure, and origin // Quat. Int. 2016. Vol. 409. Part A. P. 44–49.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.018>
- Mamedov A.V.* The Late Pleistocene–Holocene history of the Caspian Sea // Quat. Int. 1997. Vol. 41–42. P. 161–166.
- Murray A.S., Thomsen K.J., Masuda N., Buylaert J.-P., Jain M.* Identifying well-bleached quartz using the different bleaching rates of quartz and feldspar luminescence signals // Radiation Measurements. 2012. Vol. 47. P. 688–695.
- Taratunina N.A., Buylaert J.P., Kurbanov R.N., Yanina T.A., Makeev A.O., Lebedeva M.P., Utkina A.O., Murray A.S.* Late Quaternary evolution of lower reaches of the Volga River (Raygorod section) based on luminescence dat-

- ing // *Quat. Geoch.* 2022. Vol. 72.  
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101369>
- Taratunina N., Rogov V., Streletskaia I., Thompson W., Kurchatova A., Yanina T., Kurbanov R. Late Pleistocene cryogenesis features of a loess-paleosol sequence in the Srednyaya Akhtuba reference section, Lower Volga River valley, Russia // *Quat. Int.* 2021. Vol. 590. P. 56–72.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.12.015>
- Tudryn A., Leroy S.A.G., Toucanne S., Gibert-Brunet E., Tucholka P., Lavrushin Y.A., Dufaure O., Miska S., Bayon G. The Ponto-Caspian basin as a final trap for south-eastern Scandinavian Ice-Sheet meltwater // *Quat. Sci. Rev.* 2016. Vol. 148. P. 29–43.
- Yanina T., Sorokin V., Bezrodnykh Yu., Romanyuk B. Late Pleistocene climatic events reflected in the Caspian Sea geological history (based on drilling data) // *Quat. Int.* 2018. Vol. 465. Part A. P. 130–141.
- Yanina T.A. Environmental variability of the Ponto-Caspian and Mediterranean basins during the last climatic macrocycle // *Geography, Environment, Sustainability.* 2020. № 13 (4). P. 6–23.  
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-120>
- Zastrozhnov A., Danukalova G., Golovachev M., Titov V., Osipova E., Simakova A., Yakovlev A., Yakovleva T., Aleksandrova G., Shevchenko A., Murray A., Tesakov A., Sadikhov E. Biostratigraphical investigations as a tool for palaeoenvironmental reconstruction the Neopleistocene (Middle-Upper Pleistocene) at Kosika, Lower Volga, Russia // *Quat. Int.* 2020. Vol. 540. P. 38–67.

## New Data on the Age of the Early Khvalynian Transgression of the Caspian Sea

R. N. Kurbanov<sup>1, 2, \*</sup>, V. R. Belyaev<sup>1</sup>, M. I. Svistunov<sup>2</sup>, E. A. Butuzova<sup>2</sup>, D. A. Solodovnikov<sup>3</sup>,  
 N. A. Taratunina<sup>1, 2</sup>, and T. A. Yanina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Volgograd State University, Volgograd, Russia*

\*e-mail: kurbanov@igras.ru

This study presents results of the first detailed absolute chronology of the Early Khvalynian transgression of the Caspian Sea based on optically stimulated luminescence (OSL) dating. Study was carried out for special facies of the Khvalynian deposits—Chocolate Clays, widely distributed in the Northern Caspian Lowland. In the studied reference sections of the Lower Volga region (Srednyaya Akhtuba, Raygorod, Leninsk), Chocolate Clays are of considerable thickness, three subfacies are distinguished in their structure: a unit of interbedded sands and loams; unit of unified dense clays; and a unit of characteristic clays with thin interlayers of silt, forming a characteristic fine-platy structure. The first unit reflects the conditions of the initial penetration of the Khvalynian waters into the studied area, the second unit reflects conditions of a deep-sea bay, while the third unit reflects the time of regression, with a significant influence of alluvial processes on sedimentation. OSL chronology was obtained for both quartz and feldspar grains using modern measuring protocols. Our dating results clearly indicate that formation of the Lower Khvalynian marine deposits in the northern part of the Lower Volga region took place between 27 and 14 ka. New data on the age of the Khvalynian deposits are further confirmed by dating of the overlying Kastanozem soils (9.6–0.7 ka) and the underlying loess-paleosol series (37–19 ka). High-resolution luminescence dating for the first time distinguished four stages in the development of the Khvalynian transgression in the Lower Volga region: the initial penetration of waters to a level of ~5 m (27 ka); stage of stabilization and gradual level rise from ~5 to ~7 m (27–20 ka); the stage of active sea level rise and movement of the coastline northward (16–15 ka); and the final regressive phase with a drop in sea level (15–14 ka).

**Keywords:** Khvalynian transgression, Caspian Sea, sea-level change, OSL dating, quartz, feldspar, chronology, Chocolate Clays

## REFERENCES

- Andrusov N.I. *O geologicheskikh issledovaniyakh v Zakaspiiskoi oblasti, proizvedennykh v 1887 g.* [On Geological Research in the Transcaspiian Region, Carried Out in 1887]. *Tr. Aralo-Kasp. Eksped.*, 1889, vol. 6.
- Arslanov Kh.A., Yanina T.A., Chepalyga A.L., Svitoch A.A., Makshaev R.R., Maksimov F.E., Chernov S.B., Tertychniy N.I., Starikova A.A. On the age of the Khvalynian deposits of the Caspian Sea coasts according to <sup>14</sup>C and <sup>230</sup>Th/<sup>234</sup>U methods. *Quat. Int.*, 2016, vol. 409, part A, pp. 81–87.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.05.067>
- Badyukova E.N. The age of the Khvalynian transgressions of the Caspian Sea. *Okeanologiya*, 2007, no. 47, pp. 432–438. (In Russ.).
- Badyukova E.N. Caspian Sea Level Fluctuations in the Neopleistocene (Was There an Atelian Regression?). *Okeanologiya*, 2021, no. 61 (2), pp. 283–291. (In Russ.).
- Bezrodnykh Yu.P., Romanyuk B.F., Sorokin V.M., Yanina T.A. First data on the radiocarbon age of the Atelian

- deposits in the North Caspian region. *Dokl. Earth Sci.*, 2017, no. 473, pp. 277–280.
- Butuzova E.A., Kurbanov R.N., Taratunina N.A., Makeev A.O., Rusakov A.V., Lebedeva M.P., Murray A.S., Yanina T.A. Shedding light on the timing of the largest Late Quaternary transgression of the Caspian Sea. *Quat. Geochronol.*, 2022, vol. 73. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101378>
- Fedorov P.V. *Pleistotsen Ponto-Kaspiya* [Pleistocene of the Ponto-Caspian Region]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 163 p.
- Hojssager P. High-resolution optically stimulated luminescence dating at the type section Srednyaya Akhtuba, Russia. Master Thesis. Aarhus: Aarhus Univ., Dep. of Geosci., 2019. 100 p.
- Költringer C., Bradák B., Stevens T., Almquist B., Banak A., Linder M., Kurbanov R., Snowball I. et al. Paleoenvironmental implications from Lower Volga loess – Joint magnetic fabric and multi-proxy analyses. *Quat. Sci. Rev.*, 2021, vol. 267, p. 107057. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107057>
- Költringer C., Stevens T., Bradák B., Almquist B., Kurbanov R., Snowball I., Yarovaya S. Enviromagnetic study of Late Quaternary environmental evolution in Lower Volga loess sequences, Russia. *Quat. Res.*, 2021, vol. 103, pp. 49–73. <https://doi.org/10.1017/qua.2020.73>
- Költringer C., Stevens T., Lindner M., Baykal Y., Ghafarpour A., Khormali F., Taratunina N., Kurbanov R. Quaternary sediment sources and loess transport pathways in the Black Sea- Caspian Sea region identified by detrital zircon U-Pb geochronology. *Glob. Planet Change*, 2022, vol. 209. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103736>.
- Kurbanov R.N., Buylaert J.-P., Stevens T., Taratunina N.A., Belyaev V.R., Makeev A.O., Lebedeva M.P., Rusakov A.V., Solodovnikov D., Költringer C., Rogov V.V., Streletskaya I.D., Murray A.S., Yanina T.A. A detailed luminescence chronology of the Lower Volga loess-palaeosol sequence at Leninsk. *Quat. Geochronol.*, 2022, vol. 73. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101376>
- Kurbanov R., Murray A., Thompson W., Svistunov M., Taratunina N., Yanina T. First reliable chronology for the early Khvalynian Caspian Sea transgression in the Lower Volga River valley. *Boreas*, 2021, vol. 50, no. 1, pp. 134–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.1111/bor.12478>
- Kurbanov R.N., Semikolennykh D.V., Yanina T.A., Tyunin N.A., Murray A.S. New data on the age of the Karangatian transgression of the Black Sea. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2020, no. 6, pp. 139–145. (In Russ.).
- Kurbanov R.N., Svitoch A.A., Yanina T.A. New data on marine Pleistocene stratigraphy of the Western Cheleken peninsula. *Dokl. Earth Sci.*, 2014, no. 459, pp. 1623–1626.
- Kurbanov R.N., Ulyanov V.A., Anoykin A.A., Pavlenok G.D., Semikolennykh D.V., Kharevich V.M., Taymagambetov Zh.K., Murray A.S. The first luminescence chronology of the initial Upper Paleolithic of Eastern Kazakhstan (case study of the Ushbulak archaeological site). *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2021, no. 5, pp. 131–148. (In Russ.).
- Lavrushin Yu.A., Spiridonova E.A., Tudryn A., Chalié F., Antipov M.P., Kuralenko N.P., Kurina E.E., Tucholka P. The Caspian Sea: hydrological events of the Late Quaternary. *Bull. Kom. po Izuch. Chetv. Per.*, 2014, no. 73, pp. 19–51. (In Russ.).
- Lebedeva M., Makeev A., Rusakov A., Romanis T., Yanina T.A., Kurbanov R., Kust P., Varlamov E. Landscape dynamics in the Caspian Lowlands since the last deglaciation reconstructed from the pedosedimentary sequence of Srednyaya Akhtuba, southern Russia. *Geosci.*, 2018, vol. 8, no. 492, pp. 1–21. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120492>
- Leroy S.A.G., Chalié F., López-Merino L., Gasse F. From the Allerød to the mid-Holocene: palynological evidence from the south basin of the Caspian Sea. *Quat. Sci. Rev.*, 2015, vol. 78, pp. 77–97. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.032>
- Makeev A., Lebedeva M., Kaganova A., Rusakov A., Kust P., Romanis T., Yanina T., Kurbanov R. Pedosedimentary environments in the Caspian Lowland during MIS5 (Srednyaya Akhtuba reference section, Russia). *Quat. Int.*, 2021, vol. 590, pp. 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.03.015>
- Makshaev R.R., Svitoch A.A. Chocolate clays of the northern Caspian Sea region: distribution, structure, and origin. *Quat. Int.*, 2016, vol. 409, part A, pp. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.018>
- Makshaev R.R., Tkach N.T. Chronology of Khvalynian stage of the Caspian Sea according to radiocarbon dating. *Geom. i Paleog.*, 2023, vol. 54, no. 1, pp. 37–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0435428123010108>
- Mamedov A.V. The Late Pleistocene-Holocene history of the Caspian Sea. *Quat. Int.*, 1997, vol. 41–42, pp. 161–166.
- Moskvitin A.I. *Pleistotsen Nizhnego Povolzh'ya* [Pleistocene of the Lower Volga Region]. Moscow: Tr. GIN 64, 1962. 263 p.
- Murray A.S., Thomsen K.J., Masuda N., Buylaert J.-P., Jain M. Identifying well-bleached quartz using the different bleaching rates of quartz and feldspar luminescence signals. *Radiat. Meas.*, 2012, vol. 47, pp. 688–695. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.05.006>
- Rychagov G.I. *Pleistotsenovaya istoriya Kaspiiskogo morya* [Pleistocene History of the Caspian Sea]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1997. 267 p.
- Rychagov G.I. Khvalynian epoch in the history of the Caspian Sea. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2014, no. 4, pp. 3–9. (In Russ.).
- Semikolennykh D.V., Kurbanov R.N., Yanina T.A. Age of the Khvalynian straight in the Late Quaternary of the Manych Depression. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2022, no. 5, pp. 103–112.
- Shakhovets S.A. Chronology of Paleogeographical Events of the Late Pleistocene of the Lower Volga (According to the TL Method). *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1987. 24 p.

- Svitoch A.A. About the nature of the Khvalynian transgression of the Caspian Sea. *Okeanologiya*, 2007, no. 47, pp. 304–311. (In Russ.).
- Svitoch A.A. *Bol'shoi Kaspiy: stroenie i istoriya razvitiya* [Greater Caspian: Structure and Evolution History]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2014. 272 p.
- Taratunina N.A., Buylaert J.P., Kurbanov R.N., Yanina T.A., Makeev A.O., Lebedeva M.P., Utkina A.O., Murray A.S. Late Quaternary evolution of lower reaches of the Volga River (Raygorod section) based on luminescence dating. *Quat. Geochronol.*, 2022, vol. 72. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101369>
- Taratunina N.A., Rogov V., Streletskaya I., Thompson W., Kurchatova A., Yanina T., Kurbanov R. Late Pleistocene cryogenesis features of a loess-paleosol sequence in the Srednyaya Akhtuba reference section, Lower Volga River valley, Russia. *Quat. Int.*, 2021, vol. 590, pp. 56–72. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.12.015>
- Tudryn A., Leroy S.A.G., Toucanne S., Gibert-Brunet E., Tucholka P., Lavrushin Y.A., Dufaure O., Miska S., Bayon G. The Ponto-Caspian basin as a final trap for southeastern Scandinavian Ice-Sheet meltwater. *Quat. Sci. Rev.*, 2016, vol. 148, pp. 29–43. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.019>
- Yanina T.A. Environmental variability of the Ponto-Caspian and Mediterranean basins during the last climatic macrocycle. *Geogr. Environ. Sustain.*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 6–23. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-120>
- Yanina T.A., Sorokin V., Bezrodnykh Yu., Romanyuk B. Late Pleistocene climatic events reflected in the Caspian Sea geological history (based on drilling data). *Quat. Int.*, 2018, vol. 465, part A, pp. 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.08.003>
- Yanina T.A., Svitoch A.A., Kurbanov R.N., Murray A.S., Tkach N.T., Sychev N.V. Experience of dating of Pleistocene deposits of the Lower Volga area by method of optically stimulated luminescence. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2017, no. 2, pp. 21–29. (In Russ.).
- Zastrozhnov A., Danukalova G., Golovachev M., Titov V., Osipova E., Simakova A., Yakovlev A., Yakovleva T., Aleksandrova G., Shevchenko A., Murray A., Tesakov A., Sadikhov E. Biostratigraphical investigations as a tool for palaeoenvironmental reconstruction the Neopleistocene (Middle-Upper Pleistocene) at Kosika, Lower Volga, Russia. *Quat. Int.*, 2020, vol. 540, pp. 38–67. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.11.036>

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ  
И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 504.4.062(54)

ВОДНЫЙ КРИЗИС ИНДИИ:  
НЕКСУСНО-РЕГИОНАЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ РЕШЕНИЯ

© 2023 г. Г. В. Сдасюк<sup>а</sup>, \*, Н. Н. Алексеева<sup>б</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>б</sup>Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: galsdas@bk.ru

\*\*e-mail: nalex01@mail.ru

Поступила в редакцию 08.08.2022 г.

После доработки 20.10.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

В Индии, которая в 2023 г. заняла первое место в мире по численности населения, быстрое технологическое-экономическое развитие сочетается с усилением дефицита природных ресурсов, особенно остро проявляющегося в недостатке водных ресурсов. Увеличение объемов водопотребления (около 90% воды идет на нужды ирригации), усиление конкуренции за водные ресурсы со стороны сельского хозяйства, энергетики, промышленности, урбанизации и др. требуют перехода от секторного управления водопользованием к управлению на основе концепции нексуса – сцепления связей секторов. Центральным выступает нексус “вода–энергия–продовольствие”, который стал активно изучаться с начала 2010-х годов. Разрабатываемая новая редакция Национальной водной политики Индии фокусируется на задачах развития нексуса, включая более тесные связи между секторальными программами и планами развития. В статье на основе обзора научных публикаций, критического анализа прогнозов и сценариев, использования баз статистических данных выявлены основные взаимосвязи между звеньями нексуса “вода–энергия–продовольствие”. Установлены наиболее острые проблемы рационализации использования водных ресурсов на уровне страны, отдельных штатов и крупных речных бассейнов (проект “Чистый Ганг”). Рассмотрены принимаемые в Индии технологические и управленческие решения, нацеленные на преодоление проблем водопользования на основе нексусного подхода. Новой движущей силой выступает ускоренное развитие возобновляемых источников энергии. Проблемы нексуса “вода–энергия–продовольствие”, которые усложняются в условиях изменений климата, могут успешно решаться только в контексте интегрального регионального развития.

**Ключевые слова:** Индия, дефицит водных ресурсов, водопользование, энергетика, сельское хозяйство, продовольственная проблема, взаимосвязи, социально-экономическое развитие

**DOI:** 10.31857/S2587556623030093, **EDN:** QSPVSU

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Индия – страна с высокими темпами роста экономики (от 6.5 до 8.4% в 2021/22 финансовом году, оценка) и продолжающимся демографическим взрывом<sup>1</sup>. В 2023 г. страна заняла первое место по численности населения, а к 2050 г. она может достигнуть 1.7 млрд чел. При ограниченных запасах природных ресурсов Индия столкнулась с обострением водного дефицита, переходящим в водный кризис. В Докладе Национального института трансформации Индии (НИТИ Айог) констатируется, что страна страдает от худшего в истории водного кризиса, угрожающего жизни миллионов людей. 86% поверхностных и подзем-

ных источников воды загрязнены. Почти половина населения (600 млн чел.) испытывает чрезвычайный водный дефицит, около 200 тыс. чел. ежегодно умирают из-за неочищенной воды<sup>2</sup>.

Ежегодно возобновляемые водные ресурсы составляют 1911 км<sup>3</sup>, из которых используется, по оценкам ФАО, около 40% (761 км<sup>3</sup>)<sup>3</sup>. Свыше 90% расходуется на нужды сельского хозяйства (при среднемировом уровне 70%). При сохранении современных тенденций потребности воды в 2030 г. вдвое превысят ее обеспечение, что приведет к

<sup>2</sup> [https://www.business-standard.com/article/economy-policy/india-facing-worst-water-crisis-millions-of-lives-under-threat-niti-aayog-118061400997\\_1.html](https://www.business-standard.com/article/economy-policy/india-facing-worst-water-crisis-millions-of-lives-under-threat-niti-aayog-118061400997_1.html) (дата обращения 07.05.2022).

<sup>3</sup> [https://tableau.apps.fao.org/views/ReviewDashboard-v1/country\\_dashboard?%3Aembed=y&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y](https://tableau.apps.fao.org/views/ReviewDashboard-v1/country_dashboard?%3Aembed=y&%3AisGuestRedirectFromVizportal=y) (дата обращения 21.09.2022).

<sup>1</sup> <https://www.imemo.ru/publications/relevant-comments/text/india-2022-economic-growth-marked> (дата обращения 15.05.2022).

потере 6% ВВП. Водный дефицит усиливается в городах: 21 крупнейший мегаполис, включая столицу Дели, приближаются к исчерпанию ресурсов подземных вод.

Для снижения остроты водохозяйственной ситуации предпринимаются различные меры. С 2002 г. реализуется грандиозная программа создания единой водной системы за счет переброски стока гималайских рек в полуостровную часть. Она позволит увеличить площадь орошаемой пашни и уменьшить остроту экологических проблем водопользования – прежде всего, обмеления рек в сухой сезон и истощения вековых запасов подземных вод (Алексеева, 2017). С 2019 г. разрабатывается новая Национальная водная политика Индии. Три предыдущих версии (1987, 2002, 2012 гг.) не привели к каким-либо заметным улучшениям в управлении водными ресурсами (Pandit and Biswas, 2019). Министерство Джалшаки (*хинди*, Министерство водной энергии) учредило комитет экспертов по подготовке современного варианта водной политики. Ее цель – “оптимизация использования водных ресурсов в соответствии с ключевыми изменениями структуры управления водопользованием и основами регулирования”<sup>4</sup>.

Увеличение объемов водопотребления в Индии и рост конкуренции за водные ресурсы со стороны сельского хозяйства, энергетики, промышленности, коммунально-бытового водоснабжения требуют перехода от секторного управления водопользованием к управлению на основе концепции нексуса (*лат.*, связь, сцепление связей). Центральным выступает нексус “вода–энергетика–продовольствие” (ВЭП). Учет взаимозависимости его звеньев в региональном развитии может повысить эффективность использования ресурсов, обеспечив справедливое распределение выгод между секторами.

Цель статьи – систематизация и анализ взаимосвязей между водными ресурсами, энергетикой и производством продовольствия на основе нексусного подхода на примере Индии. В задачи статьи входит рассмотрение происходящих изменений взаимосвязей ВЭП в Индии под воздействием природно-экологических ограничений, технологических достижений, институционального развития, а также прогнозов водопотребления по разным сценариям до 2050 г.

## ОБЗОР РАНЕЕ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Нексусный подход широко применяется в мире для управления природными ресурсами и экосистемными услугами в целях снижения экологи-

ческих рисков и дефицита ресурсов в условиях глобальных изменений. В базе полнотекстовых источников Science Direct представлено свыше 9300 публикаций (май 2022 г.) по теме нексус “вода–энергия–продовольствие”, основанных на разных методологических подходах. “Нексусное мышление” вошло в оборот на Всемирном экономическом форуме 2008 г., понятие “нексус вода–энергия–продовольствие” введено на Боннской конференции 2011 г. «Инициирование комплексных решений для “зеленой” экономики» (Muller, 2015). Подход на основе установления взаимосвязей для обеспечения всеобщих прав на продовольственную, водную и энергетическую безопасность стал шагом вперед по сравнению с отраслевым управлением использованием природных ресурсов, которое по-прежнему преобладает в мировой практике (Kholod et al., 2021; Rasul and Sharma, 2015). Интерес к этой концепции в среде ученых, политиков, международных агентств по развитию и стран-доноров усилился в связи с принятием ООН Целей устойчивого развития на 2015–2030 гг. В докладе ФАО “Нексус Вода–Энергетика–Продовольствие” подчеркивается необходимость использования синергии взаимосвязей ВЭП для сокращения нищеты и устойчивого развития. При этом обращается внимание на недостаточную изученность: “Все еще не хватает надежных и политически ориентированных данных для обоснованных решений о распределении воды. Необходимо эффективные механизмы междисциплинарных консультаций ..., чтобы они составляли часть интегрированной, перспективной межсекторной стратегии” (The Water-Energy-Food ..., 2014, p. 2).

Концепция нексуса применяется для изучения взаимосвязей в разных секторах: звеньями выступают не только вода, энергия, продовольствие, но и здоровье населения, землепользование, экосистемы и т.п. (Al-Saidi and Elagib, 2017; Biggs et al., 2015). Ряд авторов утверждает, что междисциплинарный характер этого подхода не нов, апеллируя к интегрированному управлению водными ресурсами (ИУВР) как межотраслевому подходу, широко применяемому на практике после Всемирного саммита по устойчивому развитию в Йоханнесбурге (2002) (Benson et al., 2015). Однако многие полагают, что нексусный подход имеет большие возможности для продвижения в сфере водных ресурсов, энергетики и сельского хозяйства, так как он многоцентричен и каждый сектор имеет одинаковую важность, в то время как подход ИУВР является водоцентричным (Abdullaev and Rakhmatullaev, 2016; Benson et al., 2015; Liu et al., 2017). Взаимосвязь ВЭП принимается более широким кругом заинтересованных сторон, чем ИУВР, особенно в сельском хозяйстве и энергетике (Cai et al., 2018; Opoku et al., 2022). Растущий интерес к подходу на основе нексуса связан также с влиянием изменений климата на водную, энер-

<sup>4</sup> <https://pib.gov.in/Pressreleaseshare.aspx?PRID=1782283> (дата обращения 15.06.2022).



Рис. 1. Основные звенья взаимосвязей (нексуса) вода–энергетика–продовольствие в Индии.

гетическую и продовольственную безопасность (Han et al., 2022). Однако большинство работ по тематике нексуса ВЭП сосредотачиваются на одном или двух процессах взаимосвязей, далеко не всегда создается представление о проблеме нексуса в целом (Simpson et al., 2019; Wichelns et al., 2017). То же самое касается и исследований по проблеме ВЭП в Индии (Kholod et al., 2021). Указывается, что для анализа всех взаимосвязей между водой, энергией и продовольствием необходим более комплексный методологический подход.

## ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования выступает Индия, которая во все больших масштабах сталкивается с истощением водных ресурсов, обострением продовольственной проблемы и необходимостью обеспечения энергетической безопасности в условиях быстрого роста экономики. Постольку нексусный подход направлен на достижение компромиссов между секторами и усиление синергии при использовании ресурсов с учетом социальных и экологических последствий, исследование включало систематизацию существующих взаимосвязей между водными ресурсами, энергетикой и сельским хозяйством, а также анализ инструментов, которые реализуют эти взаимосвязи. Концептуальная схема рассмотрения взаимосвязей “вода–энергетика–продовольствие” представлена на рис. 1.

Схема ориентирована на макроуровень (страна), при переходе на более низкие уровни исследования (штаты, дистрикты, бассейны и проч.) отдельные звенья взаимосвязей могут меняться. Поскольку развитие сельского хозяйства и водопользование находится в компетенции штатов, формирующих свою аграрную политику с учетом

доступности воды, их рассмотрение должно детализироваться с учетом имеющихся данных. В качестве основных источников использованы официальные данные правительства Индии, труды зарубежных и российских ученых, публикации в индийских средствах массовой информации, отчеты и статистические данные международных организаций (ООН, ФАО и др.), информация Индийского статистического портала.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выявление ключевых взаимосвязей, потребностей и потенциальной синергии трех основных блоков нексуса учитывается при разработке стратегий регионального экономического развития и мер по адаптации к глобальным климатическим изменениям. Ниже рассмотрены основные взаимосвязи, характеризующие звенья “водные ресурсы–энергетика”, “водные ресурсы–продовольствие”, “сельское хозяйство–энергетика”.

**Водные ресурсы для энергетики.** В Индии в энергетике ежегодно используется 30 млрд м<sup>3</sup> воды, из них почти 6 млрд безвозвратно. На водоемкое охлаждение ТЭС, работающих на угле, приходится 88% общего водопотребления в промышленности и энергетике. Поскольку в стране эксплуатируются ТЭС старого поколения с открытым контуром или прямоточными технологиями охлаждения, средняя интенсивность использования воды составляет около 80–160 м<sup>3</sup>/МВт·ч, что в 40–80 раз выше, чем в современной замкнутой или рециркуляционной системах (UN World ..., 2014).

Дефицит воды оказывает негативное воздействие на работу ТЭС. По оценкам, 40% ТЭС размещаются в районах водного дефицита, из-за чего уровень их использования на 21% ниже, чем у ТЭС с нормальным водообеспечением. При со-

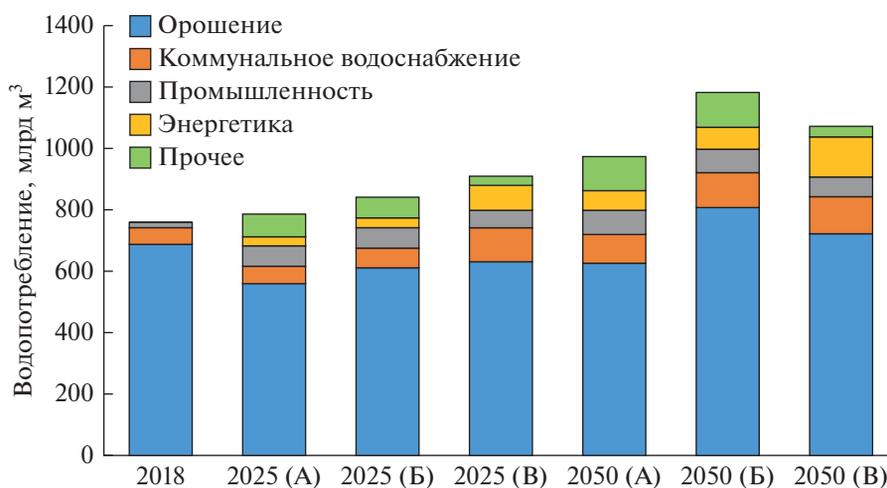


Рис. 2. Структура и прогноз водопотребления в Индии, млрд м<sup>3</sup>.

Составлено по: данным (Report ..., 2006) при нижнем пределе (А) и верхнем пределе (Б) численности населения; (В) данным (Kholod et al., 2019); данные за 2018 г. по: [https://storage.googleapis.com/fao-aquastat.appspot.com/countries\\_regions/factsheets/irrigation\\_area/en/IND-IRR.pdf](https://storage.googleapis.com/fao-aquastat.appspot.com/countries_regions/factsheets/irrigation_area/en/IND-IRR.pdf).

хранении современных тенденций 70% ТЭС столкнутся с чрезвычайной нехваткой воды в 2030 г. (Liu et al., 2018). Свыше 70% электроэнергии Индии в 2040 г. будут генерировать электростанции, ныне строящиеся и проектируемые. Эти стройки размещаются с учетом обеспечения территорий водой; вводятся нормы водоемкости ТЭС. Планируется, что доля новых ТЭС, использующих пресную воду, уменьшится с 90 до 65% за счет технологий по сокращению водоемкости охлаждающих систем. Это уменьшит потребление на 12.4 млрд м<sup>3</sup> пресной воды (количества, достаточного для годового потребления питьевой воды 120 млн человек).

На ГЭС вырабатывается 7% электроэнергии в Индии. Функционируют свыше 5100 гидроузлов с водохранилищами, вмещающими 303 млрд м<sup>3</sup> (2015 г.), или 44% поверхностных водных ресурсов. По окончании ведущегося строительства водохранилищ их объем увеличится на 33–37 млрд м<sup>3</sup>, но процессы заиливания могут привести к потере 53 млрд м<sup>3</sup> объема водохранилищ к 2050 г. (Сда-сюк, 2021).

**Энергетика для водных ресурсов.** Электроэнергия используется для откачки, очистки, опреснения и транспортировки воды для разных нужд. Для стимулирования снижения нагрузки на водные ресурсы предпринимаются разнообразные меры, в том числе введение дифференцированной стоимости для разных потребителей электроэнергии (Faster ..., 2015).

Обеспечение чистой питьевой водой в значительной степени зависит от потребления электроэнергии. В материалах правительства Индии (Economic ..., 2020) отмечается, что население,

сталкивающееся с энергетическими проблемами, обычно не имеет доступа к чистой питьевой воде и, следовательно, страдает от заболеваний, передающихся через воду. Цены на электроэнергию непосредственно оказывают влияние на доступность и обеспеченность питьевой водой (Katekar et al., 2021).

**Водные ресурсы для производства продовольствия.** Иригация абсолютно преобладает в потреблении водных ресурсов, но ее доля постепенно снижается — с 90% в 2018 г. до 64–68% в 2050 г. (рис. 2) при увеличении доли водных ресурсов, используемых для нужд энергетики. Прогнозы, представленные в разных исследованиях, существенно отличаются между собой: если в 2025 г. ожидается снижения водопотребления для нужд иригации в сравнении с 2018 г., то в 2050 г. эти показатели в большинстве прогнозов возрастут. Официальный прогноз Национальной комиссии по интеграции водных ресурсов и развитию основан на расчете водопотребления по международным нормам при верхнем [см. на рис. 2 параметры (А)] и нижнем [см. на рис. 2 параметры (Б)] пределах роста численности населения. Другие данные по водопотреблению получены на основе Модели анализа глобальных изменений GCAM (Kholod et al., 2021). Признается, что ни один инструмент не может спрогнозировать водопотребления и аспекты взаимосвязей ВЭП, поэтому для выявления региональных тенденций, а также вариантов смягчения последствий нехватки воды в Индии важны исследования “снизу–вверх” и более подробные модели.

В стране создан иригационный потенциал в 139.5 млн га, но в действительности орошается

**Таблица 1.** Изменение орошаемых площадей по источникам ирригации, 1960–2000 гг., млн га

Год	Каналы	Танки (пруды)	Помповые колодцы	Другие колодцы	Другие источники	Общая чистая орошаемая площадь
1960/61	10.4	4.6	0.2	7.2	2.4	24.7
1970/71	12.9	4.1	4.5	7.4	2.3	31.1
1980/81	15.2	3.2	9.5	8.2	2.6	38.7
1990/91	17.5	2.9	14.3	10.4	2.9	48.0
2000/01	15.0	2.5	22.6	11.3	2.9	55.1
2008/09	16.6	2.0	26.0	12.6	6.0	63.2

Источник. <http://www.indianstatistics.org.citation.html>

68 млн га (2018 г.)<sup>5</sup>. Стоит задача ввести в действие созданные, но не используемые 19 млн га (2016 г.). С начала 1980-х годов площадь, орошаемая каналами, практически не меняется<sup>6</sup>. На многих территориях произошло значительное снижение масштабов прямого орошения из каналов (табл. 1) из-за износа инфраструктуры, заиливания водохранилищ и неэффективного управления орошением. В то же время просачивание из каналов способствует восполнению запасов подземных водоносных горизонтов и увеличивает потенциал орошения на основе подземных вод.

Расширение ирригации в 1970–1980-х годах в основном происходило за счет широкого использования помповых колодцев<sup>7</sup> – основы “зеленой революции” (см. табл. 1). Эта политика делала упор на повышение агротехнического уровня сельского хозяйства путем использования высокоурожайных сортов, что требовало расширения применения удобрений, невозможного без ирригации (Маляров, 2010). В 1970–1990 гг. площадь земель, орошаемых с помощью помповых колодцев, росла каждое десятилетие на 5 млн га, достигнув максимума в 1990–2000 гг. в 8.3 млн га; но в 2001–2009 гг. прирост уменьшился до 3.4 млн га. Откачивая около 251 км<sup>3</sup> подземных вод, Индия стала их крупнейшим потребителем (четверть мирового потребления). Использование подземных вод обеспечивает свыше 65% орошаемых земель и 85% питьевой воды страны (Сдасюк, 2021).

Поставив в качестве первоочередной задачи решение продовольственной проблемы, государство предоставило крестьянам субсидии на электроэнергию (иногда бесплатную), что привело к избыточной откачке подземных вод. Вода стала товаром для многих владельцев колодцев. Низкие

субсидированные цены на электроэнергию стали причиной снижения уровня подземных вод во многих штатах – в Западной Бенгалии, Гуджарате, Андхра-Прадеше, Карнатаке, Пенджабе и Харьяне (Katekar et al., 2021).

Начавшееся недавно активное внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для откачки подземных вод и подачи воды на поля создает как новые возможности для развития ирригации, так и проблемы. Установленные мощности электростанций на возобновляемых источниках выросли с 75 ГВт в 2014 г. до 160 ГВт в 2022 г., более чем удвоившись<sup>8</sup>, а Индия вышла на третье место в мире по производству электроэнергии на ВИЭ. Стоимость солнечной энергии на энергетическом рынке постоянно снижается. Так, стоимость электричества, выработанного на солнечных станциях, составила в среднем 34 долл./МВт · ч, в то же время стоимость производства электроэнергии на угле – 45 долл./МВт · ч (2018/2019 г.), что сделало солнечную энергию более конкурентоспособной<sup>9</sup>.

С 2019 г. действует “Миссия ирригации на основе солнечной энергии”, осуществляющая схему КСУМ (*Pradhan Mantri Kisan Urja Suraksha evam Utthaan Mahabhiyan*). Это одна из крупнейших в мире инициатив, направленная на внедрение солнечных установок для помповых колодцев. С государственной помощью в фермерских хозяйствах будет создано 3.5 млн установок, эффективность которых зависит от интегрального развития локального уровня. В то же время обеспечение электроэнергией водяных насосов из возобновляемых источников повышает риски еще большего истощения подземных водоносных горизонтов.

**Сельское хозяйство для водных ресурсов.** Острога водного кризиса в Индии может быть снижена за счет диверсификации сельскохозяйственных

<sup>5</sup> [https://storage.googleapis.com/fao-aquastat.appspot.com/countries\\_regions/factsheets/irrigation\\_area/en/IND-IRR.pdf](https://storage.googleapis.com/fao-aquastat.appspot.com/countries_regions/factsheets/irrigation_area/en/IND-IRR.pdf) (дата обращения 17.05.2022).

<sup>6</sup> <http://www.indianstatistics.org/irrigation.html> (дата обращения 03.06.2022).

<sup>7</sup> Скважинные колодцы с электроприводом для откачки подземных вод, используемых для орошения.

<sup>8</sup> <https://www.investindia.gov.in/sector/renewable-energy> (дата обращения 10.06.2022).

<sup>9</sup> <https://insideclimatenews.org/news/20052019/india-solar-investment-coal-modi-election-renewable-energy-future> (дата обращения 07.08.2022).

культур. Для этого предлагается расширить операции по государственным закупкам, включив в них менее водоемкие зерновые, бобовые и масличные культуры. Это побудило бы фермеров разнообразить севообороты такими культурами, что привело бы к огромной экономии воды. Перспективной агротехнологией становится выращивание суходольного риса прямого посева, которое требует на 25–57% меньше воды, чем заливной рис. Неорошаемый рис дает более низкие или аналогичные урожаи зерна (Dagar, 2021).

**Сельское хозяйство для энергетики.** Политика правительства Индии нацелена на поощрение развития биоэнергетики и использования биомассы. Для получения биодизеля<sup>10</sup> в основном выращиваются масличные культуры, для производства биоэтанола<sup>11</sup> – сахарный тростник и зерновые. Доля биодизеля в общем объеме производства биотоплива увеличилась почти в 10 раз, с 3% в 2000 г. до 32% в 2020 г., на биоэтанол по-прежнему приходится две трети (Powell et al., 2022). Создаются крупномасштабные плантации биоэнергетических культур для производства топлива второго поколения, для чего также используются отходы биомассы сельского (солома, багасса) и лесного хозяйства. Несмотря на то, что посевы биотопливных культур стремятся размещать на маргинальных малопродуктивных землях (Gunatilake et al., 2014), получение биотоплива из продовольственных культур вызывает острые дебаты и критику.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Взаимосвязи отдельных звеньев нексуса ВЭП на примере Индии отражают противоречия между секторами, обостряющиеся на уровне штатов. Так, конкуренция между энергетикой и водопользованием усиливается в штатах с острой нехваткой воды. Управление сложными взаимосвязями успешно, когда осуществляется интеграция секторов, благодаря чему достигаются компромиссы и предотвращаются потенциальные конфликты между производством энергии и продовольствия в условиях дефицита воды (Benson et al., 2015).

Примером подобного управления нексусом ВЭП и разрешения межсекторного конфликта стала ситуация в штате Гуджарат на западе Индии. В этом экономически развитом штате отмечалась чрезмерная эксплуатация водоносных горизонтов для орошения в бассейнах рр. Махи и Сабармати, несмотря на предпринятые с начала 1970-х годов усилия по регулированию расхода

подземных вод и попытки установить рациональный тариф на электроэнергию для фермеров. Проблема истощения водоносных горизонтов критически обострилась в конце 1990-х годов. В 2003–2006 гг. правительство штата запустило схему *Jyotigram* (“Освещенная деревня”), в рамках которой было инвестировано 290 млн долл. для отделения сельскохозяйственных источников электроэнергии от прочих и нормирования электроэнергии для фермеров. В 2006 г. почти все 18 тыс. деревень Гуджарата были охвачены этой схемой. Она включала два основных механизма: деревни получили круглосуточное трехфазное электроснабжение для бытовых нужд по счетчику, а владельцы помповых колодцев – электроэнергию полного напряжения на 8 часов в сутки по графику. Схема рационализации электроснабжения позитивно повлияла на крупных и средних фермеров и негативно – на маргинальные хозяйства и безземельных крестьян, доступ которых к орошению зависел от рынка воды. Цены на воду, взимаемые владельцами помповых колодцев, выросли на 30–50% (Shah et al., 2008). Тем не менее программа *Jyotigram* радикально изменила ситуацию: вдвое сократились субсидии на электроэнергию сельскому хозяйству, снизился перерасход подземных вод, облегчились проблемы водоснабжения предприятий. “Модель Гуджарата” стала символом успеха системы регионального управления. Она была реализована в период, когда правительство штата Гуджарат возглавлял Н. Моди (2000–2014 гг.), ныне премьер-министр Индии.

Однако реализация проектов регионально-бассейнового развития на нексусной основе наталкивается на многие трудности. Яркий пример тому – мегапроект “Чистый Ганг”, официально провозглашенный в 1985 г., но поныне далекий от осуществления. На бассейн Ганга приходится 30% речного стока Индии, 26% площади и свыше 40% населения. Бассейн простирается в 8 штатах, на его берегах стоят 118 городов. Индусы поклоняются реке как божеству: Ганга – священна, Ганга – “мать”<sup>12</sup>. При этом Ганг одна из самых загрязненных рек мира: 3/4 промышленных и бытовых отходов поступают в нее неочищенными, свыше 600 км реки представляют экологически “мертвую зону” (Сдасюк, 2021).

Н. Моди, возглавивший правительство в мае 2014 г., уже в июне 2014 г. провозгласил одним из приоритетов развития программу “Мать Ганга” (*Namami Ganga Programme*). Была принята “Национальная Миссия чистой Ганги”, начало действовать Национальное управление бассейна Ганга, цель которого – очищение речных вод и восстановление биоразнообразия. Проект предусматривал создание инфраструктуры очистных

<sup>10</sup>Моторное жидкое топливо, получаемое на основе растительных масел.

<sup>11</sup>Этанол из переработанного растительного сырья используется как моторное топливо или присадка к бензину.

<sup>12</sup>В Индии название рек женского рода.

сооружений, системы мониторинга промышленных и бытовых отходов, береговых укреплений и улучшение состояния гхат<sup>13</sup>. На проект было ассигновано 3.06 млрд долл. Однако простое увеличение ассигнований не обеспечило успех проекта. Необходимое условие его реализации — интегральное развитие всего региона бассейна Ганга как сложной системы взаимосвязей основных секторов.

Взаимосвязи секторов усложняются, если учитывать влияние изменений климата, усиливающих неопределенность развития звеньев нексуса. По данным исследования, проведенного Индийским институтом тропической метеорологии по заказу Министерства наук о Земле (Assessment ..., 2020), к концу XXI в. среднегодовая температура воздуха в Индии повысится от 2.4 до 4.4°C в сравнении с периодом 1976–2005 гг., продолжительность периодов экстремальной жары в апреле–июне удвоится. Потепление будет сочетаться со значительными годовыми колебаниями выпадения осадков и с учащением экстремальных явлений — муссонных ливней, наводнений и засух. Все это может усугубить и без того не очень благоприятную агроприродную ситуацию, учитывая, что сейчас треть земельного фонда страны подвержена засухам и наводнениям. В течение 1951–2015 гг. в Индии наблюдалось сокращение среднегодовых осадков (Assessment ..., 2020). Но география изменений контрастна: в Центральной Индии и на Северо-Востоке количество осадков уменьшилось на 1–5 мм, а на Северо-Западе, в Джамму и Кашмире оно несколько выросло.

Изменения климата приведут к разбалансированию взаимосвязей нексуса ВЭП, так как все звенья подвержены влиянию глобальных изменений климата и каждое из них, в свою очередь, вносит свой вклад в дестабилизацию климатической ситуации. С учетом этого влияния в нексусе ВЭП появляются новые взаимосвязи, например, увеличение выбросов диоксида углерода в результате роста использования энергии, выработанной на ТЭС. При растущих концентрациях углекислого газа изменится влияние удобрений на урожайность культур и т.п. Усилится неоднозначное отношение к Национальной программе соединения рек, так как эффективность проектов межбассейновых перебросок воды может оказаться не столь существенна в случае увеличения количества осадков в засушливых регионах. В то же время растет интерес к развитию новых водосберегающих технологий, который сочетается со стремлением восстановить традиционные методы сбора и сохранения дождевой воды. Происходящие изменения климата потребуют разработки системы мер адаптации в ответ на риски усиления

экстремальных явлений и их учета в соответствующих планах регионального развития на уровне штатов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концепция нексуса вода—энергетика—продовольствие представляет конструктивную реакцию научного сообщества на обостряющиеся противоречия между ограниченными природно-экологическими ресурсами и усиливающимся антропогенным давлением на них. Опыт развития Индии, фокусирующей многие острые проблемы современности и переживающей водный кризис, имеет международное значение.

Новая водная политика, разрабатываемая в Индии, ориентирована на развитие водного хозяйства как основы всей системы социо-эколого-экономического развития. На основе нексусного подхода преодолеваются противоречия между секторами водопользования и определяются пути их решения — технически разрешимые, экономически эффективные, социально приемлемые и экологически рациональные. Все большее значение придается учету водоемкости разных отраслей и производств, что нередко определяет целесообразность изменения географии развития сельского хозяйства и энергетики.

Как показывает пример Индии, результативность нексусного подхода может достигаться только в контексте интегрального регионального развития, включая более тесные связи между секторальными программами и планами развития. Междисциплинарные исследования этих противоречивых процессов требуют применения методов анализа больших данных и углубления теории интегрального регионального развития. Единая география, обладающая уникальным междисциплинарным потенциалом, призвана играть ведущую роль в этой сфере.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена по материалам исследований по темам ГЗ Института географии РАН № 0148-2019-0008 (FMGE-2019-0008) и географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121040100322-8.

## FUNDING

The article was prepared on the basis of research materials on the topics of the State Tasks of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences no. 0148-20190008 and the Faculty of Geography of Moscow State University no. 121040100322-8.

<sup>13</sup>Гхаты — каменные сооружения для ритуального омовения индуистов или как места кремации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева Н.Н.* Проблема виртуальной воды в Индии в контексте межбассейновых перебросок речного стока // Мир геоэкологии. Геоэкологические проблемы и пути их решения. М.: ГЕОС, 2017. С. 153–162.
- Маляров О.В.* Независимая Индия. Эволюция социально-экономической модели и развитие экономики. Кн. 2. М.: Изд-во Вост. лит-ра, 2010. С. 775.
- Сдасюк Г.В.* Новая Индия. География развития: достижения, проблемы, перспективы. М.: Канон+РООИ “Реабилитация”, 2021. 520 с.
- Abdullaev I., Rakhmatullaev S.* Setting up the agenda for water reforms in Central Asia: does the nexus approach help? // Environ. Earth Sci. 2016. Vol. 75 (10). 870. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5409-8>
- Al-Saidi M., Elagib N.A.* Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus // Sci. Total Environ. 2017. Vol. 574 (1). P. 1131–1139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.046>
- Assessment of Climate Change over the Indian Region. A Report of the Ministry of Earth Sciences (MoES). Government of India; Springer Open, 2020. 227 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4327-2>
- Benson D., Gain A.K., Rouillard J.J.* Water governance in a comparative perspective: from IWRM to a ‘Nexus’ approach? // Wat. Alternatives. 2015. Vol. 8 (1). P. 756–773.
- Biggs E.M., Bruce E., Boruff B., Duncan J.M.A., Horsley J., Pauli N., McNeill K., Neef A., Van Ogtrop F., Curnow J., Haworth B., Duce S., Imanari Y.* Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods // Environ. Sci. & Policy. 2015. № 54. P. 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>
- Cai X., Wallington K., Shafiee-Jood M., Marston L.* Understanding and managing the food-energy-water nexus – opportunities for water resources research // Adv. Wat. Res. 2018. № 111. P. 259–273. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014>
- Chaturvedi V., Nagar P., Rudresh K., Kangkanika S., Hejazi N.M.* Cooperation or rivalry? Impact of alternative development pathways on India’s long-term electricity generation and associated water demands // Energy. 2020. Vol. 192. 116708. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116708>
- Dagar A.* Present and Future Requirement of Water for Agricultural Crops and Livestock / Climate Resilient Livestock and Production System. Karnal: National Dairy Res. Inst., 2021. P. 193–206.
- Han X., Hua E., Engel B.A., Guan J., Yin J., Wua N., Sun S., Wan Y.* Understanding implications of climate change and socio-economic development for the water-energy-food nexus: A meta-regression analysis // Agricultural Wat. Management. 2022. Vol. 269. 107693. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107693>
- Economic Survey of India 2019–2020. Vol. 1. Ministry of Finance. Delhi: Educreation Publishing, 2020. 618 p.
- Gunatilakea H., Roland-Holst D., Sugiyartoa G.* Energy security for India: Biofuels, energy efficiency and food productivity // Energy Policy. 2014. Vol. 65. P. 761–767. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.050>
- Faster, More Inclusive and Sustainable Growth // Twelfth Five Year Plan (2012–2017). Vol. 1. New Delhi: Planning Commission, Govt. of India. Vol. 54. December, 2015. P. 389–397.
- Katekar V.P., Deshmukh S.S., Vasan A.* Energy, drinking water and health nexus in India and its effects on environment and economy // J. Wat. and Clim. Change. 2021. Vol. 12 (4). P. 997–1022.
- Kholod N., Evans M., Khan Z., Hejazi M., Chaturvedi V.* Water-energy-food nexus in India: A critical review // Energy and Clim. Change. Vol. 2. December, 2021. 100060.
- Liu J., Mao G., Hoekstra A.Y., Wang H., Wang J., Zheng C., van Vliet M.T.H., Wu M., Ruddell B., Yan J.* Managing the energy-water-food nexus for sustainable development // Appl. Ener. 2018. Vol. 210. P. 377–381. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.064>
- Muller M.* The ‘Nexus’ As a Step Back towards a More Coherent Water Resource Management Paradigm // Wat. Alternatives. 2015. Vol. 8 (1). P. 675–694.
- Opoku E.K., Adjei K.A., Gyamfi C., Vuu C., Appiah-Adjei E.K., Odai S.N., Siabi E.K.* Quantifying and analysing water trade-offs in the water-energy-food nexus: The case of Ghana. Water-Energy Nexus. 2022. Vol. 5. P. 8–20.
- Pandit C., Biswas A.K.* India’s National Water Policy: ‘feel good’ document, nothing more // Int. J. Water Resour. Dev. March, 2019. Vol. 35 (6). P. 1–14. <https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1576509>
- Powell L., Sati A., Tomar V.K.* Biofuels in India: Do the benefits justify the costs? // Terra Nova. Jan. 28, 2022. <https://www.orfonline.org/expert-speak/biofuels-in-india-do-the-benefits-justify-the-costs/>
- Rasul G., Sharma B.* The nexus approach to water –energy– food security: an option for adaptation to climate change // Clim. Policy. 2015. Vol. 16 (6). P. 682–702. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1029865>
- Report of the working group on Water Resources for XI Five-Year Plan (2007–2012). New Delhi: Government of India, 2006. 268 p.
- Shah T., Bhatt S., Shah R.K., Talati J.* Groundwater governance through electricity supply management: Assessing an innovative intervention in Gujarat, western India // Agricultural Wat. Management. 2008. Vol. 95 (11). P. 1233–1242.
- The Water–Energy–Food Nexus.* A new approach in support of food security and sustainable agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014. 20 p.
- Wichelns D.* The water-energy-food nexus: Is the increasing attention warranted, from either a research or policy perspective? // Environ. Sci. Policy. 2017. Vol. 69. P. 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.018>
- Simpson G.B., Jewitt G.P.W.* The Development of the Water-Energy-Food Nexus as a Framework for Achieving Resource Security: A Review // Front. Environ. Sci. 2019. Vol. 7 (8). P. 1–9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00008>
- UN World Water Development Report 2014: Water and Energy. Paris. 2014. Vol. 1. 230 p.

## Water Crisis in India: Concept of Nexus-Regional Solution

G. V. Sdasyuk<sup>a, \*</sup> and N. N. Alekseeva<sup>b, \*\*</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, Russia*

\**e-mail: galsdas@bk.ru*

\*\**e-mail: nalex01@mail.ru*

In India, which ranks first in the world in terms of population size in 2023, rapid technological and economic development is combined with an increased scarcity of natural resources, which is especially acute in the lack of water resources. Increase of water consumption (90% of water is consumed by irrigation and agriculture), growing competition for water resources from energy, industry, urbanization, etc. require a transition from sectoral water use management to management based on the concept of nexus (*latin*)—linkage between sectors. The central is Water–Energy–Food nexus which has been studied since the early 2010s. In developing the new National Water Policy of India, attention is focused on the development of the Water–Energy–Food production nexus. The article is based on a review of scientific publications, a critical analysis of forecasts and scenarios, and the use of statistical databases. The most acute problems of water availability and rationalization of its use are discussed at the state level and at the level of large river basins (project “Pure Ganges”). Technological and managerial decisions made in India aimed at rationalizing water use based on an unsophisticated approach are considered. A new driving force is the accelerated development of renewable energy sources. The problems of the Water–Energy–Food production nexus can be successfully solved only in the context of integral regional development, which becomes more complicated under the climate change.

**Keywords:** India, nexus approach, water scarcity, water use, energy, agriculture, food problem, regional development

### REFERENCES

- Abdullaev I., Rakhmatullaev S. Setting up the agenda for water reforms in Central Asia: does the nexus approach help? *Environ. Earth Sci.*, 2016, vol. 75 (10), 870. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5409-8>
- Alekseeva N.N. The problem of virtual water in India in the context of inter-basin transfers of river flow. In *Mirgeokologii. Geoekologicheskie problemy i puti ikh resheniya* [The World of Geoecology. Geoecological Problems and Ways of Their Solution]. Moscow: GEOS Publ., 2017, pp. 153–162. (In Russ.).
- Al-Saidi M., Elagib N.A. Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus. *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 574 (1), pp. 1131–1139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.046>
- Assessment of Climate Change over the Indian Region. A Report of the Ministry of Earth Sciences (MoES)*. Government of India; Springer Open, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4327-2>
- Benson D., Gain A.K., Rouillard J.J. Water governance in a comparative perspective: from IWRM to a ‘Nexus’ approach? *Water Altern.*, 2015, no. 8, pp. 756–773.
- Biggs E.M., Bruce E., Boruff B., Duncan J.M.A., Horsley J., Pauli N., McNeill K., Neef A., Van Ogtrop F., Curnow J., Haworth B., Duce S., Imanari Y. Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. *Environ. Sci. Policy*, 2015, no. 54, pp. 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>
- Cai X., Wallington K., Shafiee-Jood M., Marston L. Understanding and managing the food–energy–water nexus – opportunities for water resources research. *Adv. Water Resour.*, 2018, no. 111, pp. 259–273. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014>
- Chaturvedi V., Nagar P., Rudresh K., Kangkanika S., Hejazi N.M. Cooperation or rivalry? Impact of alternative development pathways on India’s long-term electricity generation and associated water demands. *Energy*, 2020, vol. 192, no. 116708. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116708>
- Dagar A. Present and Future Requirement of Water for Agricultural Crops and Livestock. In *Climate Resilient Livestock and Production System*. Karnal: National Dairy Research Institute, 2021, pp. 193–206.
- Economic Survey of India 2019–2020*. Ministry of Finance. Delhi: Education Publ., 2020, vol. 1. 618 p.
- Faster, More Inclusive and Sustainable Growth. In *Twelfth Five Year Plan (2012–2017)*. Vol. 1, New Delhi: Planning Commission, Govt. of India, vol. 54, December 2015, pp. 389–397.
- Gunatilakea H., Roland-Holst D., Sugiyarto G. Energy security for India: Biofuels, energy efficiency and food productivity. *Energy Policy*, 2014, vol. 65, pp. 761–767. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.050>
- Han X., Hua E., Engel B.A., Guan J., Yin J., Wua N., Sun S., Wan Y. Understanding implications of climate change and socio-economic development for the water–energy–food nexus: A meta-regression analysis. *Agric. Water Manag.*, 2022, vol. 269(7). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107693>
- Katekar V.P., Deshmukh S.S., Vasan A. Energy, drinking water and health nexus in India and its effects on environment and economy. *J. of Water Clim. Chang.*, 2021, vol. 12 (4), pp. 997–1022.
- Kholod N., Evans M., Khan Z., Hejazi M., Chaturvedi V. Water–energy–food nexus in India: A critical review. *Energy Clim. Chang.*, December 2021, vol. 2.

- Liu J., Mao, G., Hoekstra, A. Y., Wang, H., Wang, J., Zheng, C., van Vliet M.T.H., Wu M., Ruddell B., Yan J. Managing the energy-water-food nexus for sustainable development. *Appl. Energy*, 2018, vol. 210, pp. 377–381. <https://doi.org/j.apenergy.2017.10.064>
- Malyarov O.V. *Nezavisimaya Indiya. Evolyutsiya sotsial'no-ekonomicheskoi modeli i razvitie ekonomiki* [Independent India. Evolution of Socioeconomic Model and Development of Economy]. Moscow: Vost. Lit-ra Publ., 2010. 775 p.
- Muller M. The 'Nexus' As a Step Back towards a More Coherent Water Resource Management Paradigm. *Water Altern.*, 2015, vol. 8 (1), pp. 675–694.
- Opoku E.K., Adjei K.A., Gyamfi C., Vuu C., Appiah-Adjei E.K., Odai S.N., Siabi E.K. Quantifying and analysing water trade-offs in the water-energy-food nexus: The case of Ghana. *Water-Energy Nexus*, 2022, vol. 5, pp. 8–20.
- Pandit C., Biswas A.K. India's National Water Policy: 'feel good' document, nothing more. *Int. J. Water Resour. Dev.*, March 2019, vol. 35 (6), pp. 1–14. <https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1576509>
- Powell L., Sati A., Tomar V. K. Biofuels in India: Do the benefits justify the costs? *Terra Nova*, Jan. 28, 2022.
- Rasul G., Sharma B. The nexus approach to water–energy–food security: an option for adaptation to climate change. *Clim. Policy*, 2015, vol. 16 (6), pp. 682–702. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1029865>
- Report of the working group on Water Resources for XI Five-Year Plan (2007–2012)*. New Delhi: Government of India, 2006.
- Sdasyuk G.V. *Novaya Indiya. Geografiya razvitiya: dostizheniya, problemy, perspektivy* [New India. Geography of Development: Achievements, Problems, Prospects]. Moscow: Kanon + ROOI "Reabilitaciya," 2021. 520 p.
- Shah T., Bhatt S., Shah R.K., Talati J. Groundwater governance through electricity supply management: Assessing an innovative intervention in Gujarat, western India. *Agric. Water Manag.*, 2008, vol. 95 (11), pp. 1233–1242.
- Simpson G.B., Jewitt G.P. W. The Development of the Water-Energy-Food Nexus as a Framework for Achieving Resource Security: A Review. *Front. Environ. Sci.*, 2019, vol. 7 (8), pp. 1–9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00008>
- The Water-Energy-Food Nexus. A new approach in support of food security and sustainable agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014.
- UN World Water Development Report 2014: Water and Energy*. Paris, 2014, vol. 1.
- Wichelns D. The water-energy-food nexus: Is the increasing attention warranted, from either a research or policy perspective? *Environ. Sci. Policy*, 2017, vol. 69, pp. 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.018>

УДК 504.03:504.75(282.256.341)

## ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ТИПОЛОГИЯ МУНИЦИПАЛЬНЫХ РАЙОНОВ

© 2023 г. Е. В. Антонов<sup>1, 2, \*</sup>, Ю. Р. Беляев<sup>1, \*\*</sup>, В. Р. Битюкова<sup>1, \*\*\*</sup>, А. В. Бредихин<sup>1, \*\*\*\*</sup>,  
В. С. Дехнич<sup>3, \*\*\*\*\*</sup>, Е. А. Еременко<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>, Н. А. Колдобская<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>,  
О. Е. Прусихин<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>, С. Г. Сафронов<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Казахстанский филиал, Астана, Казахстан

\*e-mail: antonovmtg@inbox.ru

\*\*e-mail: yrbel@mail.ru

\*\*\*e-mail: v.r.bityukova@geogr.msu.ru

\*\*\*\*e-mail: avbredikhin@yandex.ru

\*\*\*\*\*e-mail: vodo.ast@gmail.com

\*\*\*\*\*e-mail: eremenkoeaig@gmail.com

\*\*\*\*\*e-mail: koldobskayana@yandex.ru

\*\*\*\*\*e-mail: olegprus2000@mail.ru

\*\*\*\*\*e-mail: saffff@mail.ru

Поступила в редакцию 05.12.2022 г.

После доработки 08.02.2023 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

В статье разработана методика интегральной оценки антропогенного воздействия с пространственной дискретностью по муниципалитетам Байкальской природной территории. Оценка включает 21 нормированный показатель за период 2014–2020 гг., агрегированные в 7 субиндексов (воздействие на атмосферу, водные, лесные ресурсы, аграрное воздействие, твердые отходы, нарушенные земли и объекты накопленного вреда, а также фоновое воздействие). Для определения веса показателей проведен опрос экспертов, представляющих научное сообщество (специалисты в области интегральных оценок отдельных видов воздействия или в области экологических проблем территории), экспертное сообщество (ведущие рейтинговые агентства) и систему управления природопользованием регионов, входящих в Байкальскую природную территорию. Интегральный показатель позволил построить рейтинг муниципальных образований и выявить ключевые факторы формирования экологической ситуации. По интегральному индексу выделено пять типов территорий, по характеру антропогенного воздействия на окружающую среду выделяются подтипы. Высокий уровень воздействия характерен для крупных городов и мест локализации предприятий, особенно горнодобывающих, в которых действует полный набор компонентов нагрузки. Повышенный уровень наблюдается в городах, пригородных муниципалитетах с высокой нагрузкой от жизнедеятельности населения, а также в крупных аграрных районах с развитой добывающей промышленностью. Средний уровень характерен для небольшого числа сельских районов и малых городов из-за нагрузки от сельского и лесного хозяйства. Пониженный уровень воздействия формируется в основном в полупериферийных районах, где выделяется нагрузка на лесные ресурсы, и некоторых пригородных районах с более развитым сельским хозяйством. Низкий уровень антропогенного воздействия характерен для периферийных, слабо заселенных муниципальных районов с заметной долей загрязнения от автономных систем отопления. Особую роль в формировании экологической ситуации играют большие массивы нарушенных земель, высокие объемы образования твердых отходов и объекты накопленного вреда, оставшиеся от периода советской индустриализации.

*Ключевые слова:* интегральный индекс, антропогенное воздействие, комплексная оценка, Байкал, Центральная экологическая зона, Байкальская природная территория

DOI: 10.31857/S2587556623030032, EDN: QQTYOU

Решение современных экологических проблем — это компромисс между требованиями развития экономики и необходимостью защиты окружающей среды. Эффективное управление экологической ситуацией должно базироваться на комплексном анализе и оценке не только собственно экологических проблем территории, но и их причин. Среди них важное место занимают динамика и структурные трансформации в материальном производстве и расселении, значимость которого усиливается, особенно за счет поляризации рекреационного воздействия в зонах сверхтуризма<sup>1</sup>. Ключом к пониманию тенденций изменения антропогенного воздействия (АВ) на природную среду служит анализ влияния ведущих факторов.

Для любой крупной страны характерны значительные региональные и субрегиональные контрасты развития социально-экономических процессов и, как следствие, АВ. Для оценки их неравномерности могут применяться системы показателей в дезагрегированной форме и синтетические (интегральные) показатели. Преимущество последних — в комплексной оценке совокупности важнейших (в зависимости от целей построения такого показателя) социально-экономических процессов и экологического состояния. Отсюда следует и наглядность информации об АВ в том или ином регионе, реализуемая сравнением ряда интегральных показателей. Все это обуславливает возрастающий интерес российских исследователей и системы управления к построению и использованию интегральных индексов АВ и экологического состояния территорий.

*Байкальская природная территория* (БПТ) — уникальная природно-хозяйственная система, в состав которой входят озеро Байкал, прилегающая к нему водоохранная зона, его водосборная площадь в пределах территории Российской Федерации, особо охраняемые природные территории, а также территория шириной до 200 км на запад и северо-запад от него. Данная категория существует в первую очередь в законодательном поле, регулируется отдельным федеральным законом<sup>2</sup>.

Озеро Байкал на всех этапах развития общества оказывало большое влияние на окружающий регион. Интерес к нему в первую очередь был продиктован высоким природно-ресурсным по-

тенциалом территории: озеро богато ценной рыбой, в окружающих его горах находится множество месторождений металлических руд, а с недавнего времени обнаруживаются и месторождения нефти и газа. Наконец, Байкал выполняет роль природного водохранилища. Эти факторы обусловили экономическое развитие Прибайкальских территорий, связанное сначала с ресурсным, а затем (в годы советской власти) и с индустриальным освоением. На берегах озера возникли города-промышленные узлы. Вблизи от Байкала, по р. Ангаре, сформировался Ангаро-Енисейский территориально-производственный комплекс<sup>3</sup>, специализирующийся на цветной металлургии, лесной и деревообрабатывающей промышленности и гидроэнергетике. В настоящее время все большую актуальность приобретают туристско-рекреационные ресурсы Байкальского региона<sup>4</sup>. Все это создает необходимость изучения эколого-экономического аспекта оценки антропогенного воздействия на данной территории.

Однако хозяйственное освоение Байкальского региона несет не только позитивные, но и негативные последствия. Несмотря на низкую плотность населения в Байкальском регионе, в прибрежной зоне притоков озера находится ряд крупных городов, таких как Иркутск, Ангарск, Улан-Удэ, в которых суммарно проживает около 1.3 млн человек. В пределах вышеуказанной территории расположен ряд крупных промышленных центров, специализирующихся на тяжелой промышленности (города Шелехов, Ангарск, Байкальск, Иркутск). Это создает экономическое и демографическое давление на территорию, ведет к загрязнению атмосферы и гидросферы, нарушению уникальных природных ландшафтов и экосистем. Реципиентами воздействия являются и проживающие здесь люди. Кроме того, влияние на Байкал оказывают не только эффекты, проявляющиеся в прибрежной зоне, но и воздействия, оказываемые в пределах его обширной зоны влияния. Понимание необходимости учета этого факта в вопросах охраны Байкала и привело к появлению такого образования, как Байкальская природная территория. В 2021 г. в закон были внесены поправки, требующие проведения регулярного мониторинга состояния БПТ; кроме того, на 44-й сессии ЮНЕСКО рассматривался во-

<sup>1</sup> Общепризнанное определение сверхтуризма пока отсутствует, но все специалисты связывают этот феномен с превышением в туристической дестинации предельной пропускной способности, прежде всего социальной, т.е. сверхтуризм возникает тогда, когда хозяева и гости ощущают, что посетителей слишком много, а качество жизни в районе или качество впечатлений недопустимо ухудшается [цит. по (Александрова и др., 2021)].

<sup>2</sup> Федеральный закон от 01.05.1999 № 94-ФЗ (ред. от 30.12.2021) «Об охране озера Байкал».

<sup>3</sup> Под Ангаро-Енисейским ТПК подразумевается ТПК Ангаро-Енисейского региона (Бандман, 1980).

<sup>4</sup> Под Байкальским регионом понимаются три субъекта РФ, расположенные в окрестностях оз. Байкал: Иркутская область, Республика Бурятия и Забайкальский край (Винокуров, Суходолов, 2008). Термины Байкальский регион и БПТ не синонимичны, однако БПТ в определенных Постановлении Правительства РФ от 06.09.2000 № 661 «Об экологическом зонировании Байкальской природной территории...» границах полностью расположена в пределах Байкальского региона.

прос о включении Байкала в список природного наследия в опасности<sup>5</sup>. Вкупе все эти особенности обуславливают актуальность расчета интегрального индекса АВ для муниципальных образований, входящих в БПТ.

## ИЗУЧЕННОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Сравнение зарубежного и отечественного опыта показало, что зарубежные интегральные оценки сформировали *теоретическую базу* для исследований, предложив концепт качества жизни и устойчивого развития. Поэтому методики получения таких индексов содержат разнонаправленные показатели, основанные на эффекте декаплинга, когда социально-экономический рост должен достигаться при снижении экологических индикаторов, которые включаются в интегральные индексы в разных пропорциях (City ..., 2017; Environmental ..., 2001; Index ..., 2014; The Green ..., 2012). В индексах *социально-экономического развития* присутствуют один-два экологических показателя, вклад которых не превышает 5%; в индексах *качества жизни* их доля составляет в среднем 10–15%, а *устойчивого развития* – 20–70% (Добролюбова, 2015). Как правило, выбираются показатели экологоориентированности [развитие общественного транспорта, зеленой экономики, потенциал или использование возобновляемых источников энергии, рециклинга отходов, низкоуглеродного развития (Бобылев и др., 2012; Бобылев, Порфирьев, 2016)] или экологического управления, прозрачности и вовлеченности граждан (стратегии по зеленому развитию, общественное участие, учет рисков природных катастроф, транспарентность и пр.). Данный тип показателей чаще всего используется, когда объектами оценки служат не столько территории, сколько компании и предприятия (Sustainable ..., 2015; The Green ..., 2012; UN–Habitat ..., 2012; World’s ..., 2019).

В отечественной науке, начиная с 1980-х годов, векторная триада “воздействие–изменение–последствия” (Мухина, Рунова, 1977) стала методологической основой для конкретных методик оценки именно экологической ситуации, их методической стройности и четкости. Поэтому в российской практике раньше появились индексы АВ (Касимов и др., 2014). В них используются только показатели нагрузки. Это позволяет создать итоговый рейтинг по интегральному показателю, который строится от худшего к лучшему, выделяя главных аутсайдеров оценки, тем самым стимулируя их развитие. Зарубежные рейтинги строятся от лучшего к худшему, что позволяет

оценить конкурентоспособность субъектов, их преимущества. Это важно, поскольку рейтинг представляет информацию в форме, понятной широкому кругу лиц, и выявляет дефекты методики построения интегрального индекса (Бобылев и др., 2012).

Отечественные и зарубежные интегральные оценки имеют следующие общие черты: во-первых, расширение границ исследования за счет построения новых методик; многогранность оценок – задачи, методы и объект исследования никак не ограничены (Волошинская, Акимова, 2022); во-вторых, рост внимания к технической и технологической сторонам оценки, использованию математических методов, ГИС и проч.; в-третьих, определяющим для отбора показателей для большинства интегральных индексов служит статистическая обеспеченность<sup>6</sup>. В международных организациях и ряде стран накоплен значительный объем статистической информации, который позволяет формировать индексы согласно различным поставленным целям. Российская статистическая база имеет ограниченный набор показателей со множеством изъянов, но она постепенно совершенствуется, более полной становится обеспеченность информацией на уровне муниципальных образований. Особые проблемы создает закрытость нефинансовой отчетности предприятий, что существенно затрудняет учет локального и трансграничного воздействия. Фактор статистической обеспеченности обуславливает то, что наиболее слабо разработан локальный уровень – муниципальных образований. Большинство оценок представлено страновым, региональным или городским уровнем (Битюкова, 2022)<sup>7</sup>.

Обзор публикаций последних лет, посвященных самому широкому спектру проблем Байкальской природной территории, позволяет сделать вывод, что интегральных оценок различных видов АВ для данной территории пока не проводилось, но при этом глубоко исследованы многочисленные частные проблемы территории (Владимиров и др., 2016; Экологический ..., 2015). Наиболее разработана тематика по анализу различных аспектов рекреационной деятельности, где основной упор сделан не столько на уровне ее АВ на окружающую среду, сколько на перспективы расширения и диверсификации (Александрова и др., 2021; Евстропьева, 2021). Проблемы антропогенного воздействия на окружающую среду хозяйственного комплекса проработаны наиме-

<sup>5</sup> Раздел 7 аналитического доклада о состоянии сохранности объектов всемирного наследия по итогам 44 сессии Комитета всемирного наследия. <https://whc.unesco.org/archive/2021/whc21-44com-7-en.pdf>

<sup>6</sup> См. Долгих, Антонов, 2015; Основные показатели охраны окружающей среды-017. Федеральная служба государственной статистики. [http://www.gks.ru/bgd/regl/b\\_oxr17/Main.htm](http://www.gks.ru/bgd/regl/b_oxr17/Main.htm); Blacksmith Institute, Environmental Rating of World Cities. <http://www.blacksmithinstitute.org>

<sup>7</sup> Интегральный рейтинг ста крупнейших городов России (Топ-100) по данным 2013 года. <http://urbanica.spb.ru/?p=3821> (дата обращения 07.18.2022).

нее подробно. Чаще всего они ограничиваются анализом географии имеющихся и проектируемых промышленных объектов и оценкой участков, подвергшихся в результате функционирования промышленных объектов механическим нарушениям (Байкал ..., 2009; Байкальский ..., 2021).

Цель данного исследования заключается в разработке и апробации методики интегральной оценки АВ в разрезе муниципалитетов БПТ — территории с неравномерным размещением населения, обладающей сложной пространственной структурой АВ, требующей учета в оценке эколого-географического положения районов.

### ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Важная особенность разработанной методики — использование только открытых официальных статистических данных, публикуемых федеральными структурами (База данных показателей муниципальных образований<sup>8</sup> и Единая межведомственная информационно-статистическая система<sup>9</sup> от Росстата, База данных Росприроднадзора), а также полученных по запросу Минприроды России у региональных органов власти. Существующая система подготовки муниципальной статистики и особенно статистики поселений не разрабатывает и по этой причине делает невозможным учет значительной части показателей, отражающих ряд факторов, значимых для формирования экологической ситуации территорий и, следовательно, важных при формировании интегрального индекса антропогенного воздействия. Поэтому база данных была дополнена авторами статьи показателями, которые отсутствуют для муниципального уровня.

— *Объем выбросов от автомобильного транспорта и от маломерных судов* рассчитывался на основе данных о количестве и структуре зарегистрированных транспортных средств (по данным Федеральной налоговой службы — ФНС) и по методике расчета выбросов от передвижных источников, рекомендованной Минприроды РФ<sup>10</sup>.

— *Площадь нарушенных земель* была рассчитана методом визуального дешифрирования космических снимков высокого разрешения Sentinel-2, Landsat-8, WorldView-1, WorldView-2 с дальней-

шей верификацией на ключевых участках в ходе экспедиционных исследований. Сведения о локализации месторождений разных видов полезных ископаемых были получены на сайте Роснедр, уточнены путем дешифрирования и полевого обследования<sup>11</sup>. Средствами ГИС были определены площади всех контуров нарушенных земель для каждого временного среза и оценена их динамика за период с 2014 по 2020 г. в разрезе муниципальных образований БПТ и в разрезе поселений Центральной экологической зоны (ЦЭЗ).

— *Объем выбросов в атмосферу от сжигания топлива в автономных системах отопления индивидуальных жилых строений* рассчитывался вперевые. Для этого была проведена оценка количества индивидуальных подворий, верифицированы ее результаты по оценкам глав администраций сельских поселений, оценена площадь жилых строений в пределах ЦЭЗ с применением данных дистанционного зондирования. Оценка площади жилых строений для всей БПТ в разрезе населенных пунктов проведена путем распределения значений жилой площади, доступной в базах Росстата (БДПМО), пропорционально количеству индивидуальных подворий. Для оценки значимости влияния на атмосферу сжигания топлива в автономных системах отопления в данной работе был произведен расчет выбросов от этого процесса на двух масштабных уровнях: в разрезе муниципальных образований для БПТ в целом и на более детальном уровне в разрезе населенных пунктов для территории ЦЭЗ. Для этого были проведены опросы населения, глав и специалистов администраций в 32 муниципальных образованиях, 57 глав сельских поселений и населения в 125 городских и сельских поселениях. Опросы населения и представителей администрации использовались для выявления видов топлива, используемых в автономных системах отопления жилых строений, а также для оценки среднего потребления топлива для отопления 1 м<sup>2</sup> жилой площади.

*Разработанная методика интегральной оценки АВ* включает 5 стадий.

1. *Выбор приоритетных компонентов оценки* определялся их значимостью для БПТ и одновременно статистической обеспеченностью. Выделены блоки воздействия на атмосферу, водные, лесные ресурсы, аграрное воздействие, от образования отходов промышленности и ТКО, от нарушенных земель и объектов накопленного вреда, а также блок “фонговое воздействие” (включающий население, размещение и плотность инфраструктуры), чтобы ликвидировать недостатки официальной статистики, которая не охватывает значительную часть воздействия, связанного с

<sup>8</sup> БДПМО — База данных показателей муниципальных образований. <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Munst.htm>

<sup>9</sup> ЕМИСС — Единая межведомственная информационно-статистическая система. <https://fedstat.ru/>.

<sup>10</sup> Приказ Минприроды России от 27.11.2019 № 804 “Об утверждении методики определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха” (зарегистрировано в Минюсте России 24.12.2019 № 56957).

<sup>11</sup> [earthexplorer.usgs.gov](http://earthexplorer.usgs.gov).

**Таблица 1.** Показатели уровня антропогенного воздействия, максимальные и минимальные значения для БПТ за период 2014–2020 гг.

Блок	Обозначение	Показатель	Макс	Мин
Атмосфера	$A_1$	Выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников в расчете на площадь ареала загрязнения (застроенной площади населенных пунктов), т/км <sup>2</sup>	16.4	0
	$A_2$	Плотность выбросов автомобильного транспорта и маломерных судов, тыс. т/км маршрутной сети	8.2	0.041
	$A_3$	Коэффициент токсичности атмосферных выбросов	61.6	0.44
	$A_4$	Выбросы от автономных систем отопления, кг/площадь застроенных земель, т/га	10.8	0.04
Водные ресурсы	$B_1$	Забор воды на душу постоянного населения, м <sup>3</sup> /чел.	12083.2	0*
	$B_2$	Сброс сточных вод на душу постоянного населения, м <sup>3</sup> /чел.	11695.3	0
	$B_3$	Сброс загрязненных стоков на душу постоянного населения, м <sup>3</sup> /чел.*	951.3	0
Отходы	$C_1$	Объем образованных ТКО на душу населения, тыс. т/чел.	0.65	0.3
	$C_2$	Приведенный объем отходов с учетом класса опасности I–V (коммунальных и промышленных) на застроенную площадь, усл. т/км <sup>2</sup>	50.46	0.001
Сельское хозяйство	$D_1$	Доля сельхозугодий в площади МО, %	46.6	0
	$D_2$	Доля посевных площадей в общей площади сельхозугодий, %	63.7	0.2
	$D_3$	Поголовье крупного рогатого скота в расчете на площадь пастбищ, голов/га	486.6	3.4
Нарушенные земли	$E_1$	Доля нарушенных земель от общей площади территории, %	0.0051	0
	$E_2$	Наличие объектов накопленного вреда (отражает наличие нерекультивированных производственных зон, мест хранения накопленных отходов I–II класса опасности, шламонакопителей отходов 3 класса опасности, но расположенных вблизи Байкала или рек, впадающих в озеро), балл	1	0
Фоновое воздействие	$F_1$	Плотность постоянного населения, тыс. чел./км <sup>2</sup>	2.25	0.002
	$F_2$	Плотность автодорог, км/км <sup>2</sup>	6.4	0.006
	$F_3$	Плотность лиц (туристов), размещенных в коллективных средствах размещения на единицу территории, чел./км <sup>2</sup>	1.8	0
	$F_4$	Количество зарегистрированных транспортных средств по классам в расчете на численность населения, ед./чел.	0.59	0.22
Лесные ресурсы	$L_1$	Доля лесов, погибших под воздействием неблагоприятных факторов, в общей площади лесов, %	1.6	0
	$L_2$	Доля площади лесов, пройденных пожарами, %	49.8	0
	$L_3$	Отношение фактического объема заготовки древесины к максимально разрешенному, %	252.9	0

\* Сброс сточных вод включает в основном теплые сточные воды от объектов топливной энергетики; загрязненные сточные воды поступают от промышленности и объектов жилищно-коммунального хозяйства, их доля варьирует от 10 до 100% по муниципальным образованиям БПТ.

\*\* Забор воды в г. Петровск-Забайкальский территориально осуществляется на территории Петровск-Забайкальского муниципального района (МР).

жизнедеятельностью населения, особенно сельского.

2. По каждому блоку были отобраны *показатели*, которые, дополняя друг друга, адекватно отра-

жают разные виды антропогенного воздействия (табл. 1) в соответствии с принципами статистической достоверности, системности, обеспеченности статистической информацией, выражен-

ной территориальной дифференциации; наличия четко интерпретируемой динамики.

3. *Нормирование* проводилось по формуле линейного масштабирования. Для того чтобы нивелировать влияние статистических выбросов (экстремальных отклонений от нормального распределения значений показателей) для определения границ нормирования использовался метод так называемого межквартильного интервала. Его суть состоит в выделении интервала нормирования, очищенного от выбросов, и присвоении выбросам минимального или максимального значения (0 или 1, если интервал нормирования принят за [0; 1]). Значение межквартильного интервала рассчитывается как разница между 75 и 25 перцентилями элементов. После определения межквартильного расстояния определяются границы нормирования  $[a; b]$  по формуле (1):

$$[x_{25} - 1.5(x_{75} - x_{25}); x_{75} + 1.5(x_{75} - x_{25})], \quad (1)$$

где  $x_{25}$  и  $x_{75}$  – 25 и 75 процентиля распределения показателя,  $a = x_{25} - 1.5(x_{75} - x_{25})$ ,  $b = x_{75} + 1.5(x_{75} - x_{25})$ .

Итоговое нормирование всех наблюдений производится по формуле (2):

для  $x_i \in [a; b]$  –

$$x_i^n = \frac{x_i - a}{b - a}, \quad (2)$$

где  $x_i^n$  – нормированное значение наблюдения,  $a$  и  $b$  определены в формуле (1);

для  $x_i > b = 1$ ; для  $x_i < a = 0$ .

4. Для оценки значимости различных индикаторов было опрошено 47 экспертов из разных областей науки, разных научных школ, академических институтов и вузов, специалистов в области составления экологических рейтингов и представителей системы управления природопользованием на территории БПТ. Подбор экспертов осуществлялся исходя из необходимости учесть точку зрения научного сообщества, представителей системы управления природоохранной деятельностью и экспертного сообщества, освещающего проблемы охраны окружающей среды. Среди экспертов опрошены ведущие исследователи в своих областях, непосредственно связанные с решением отраслевых экологических проблем и специалисты, хорошо знакомые с проблематикой Байкальской природной территории. Экспертам предлагалось оценить по 9-балльной шкале значимость показателей, характеризующих разные аспекты состояния окружающей среды. Итоговые веса показателей ( $P_i$ ) получены путем вычисления среднего арифметического из всех оценок экспертов.

Мнение экспертов относительно блока “Лесные ресурсы”, имеющего значительное число высших оценок, затем блока “Твердые отходы” с несколько меньшей долей высоких оценок, оказалось консолидированным. Значительный разброс мнений характерен для блоков “Сельское хозяйство” и “Водные ресурсы”, что во многом связано с качеством и территориальным охватом собираемой статистики. Показатели блока “Атмосфера” имеют средние значения как коэффициента вариации (0.4), так и количества высоких оценок.

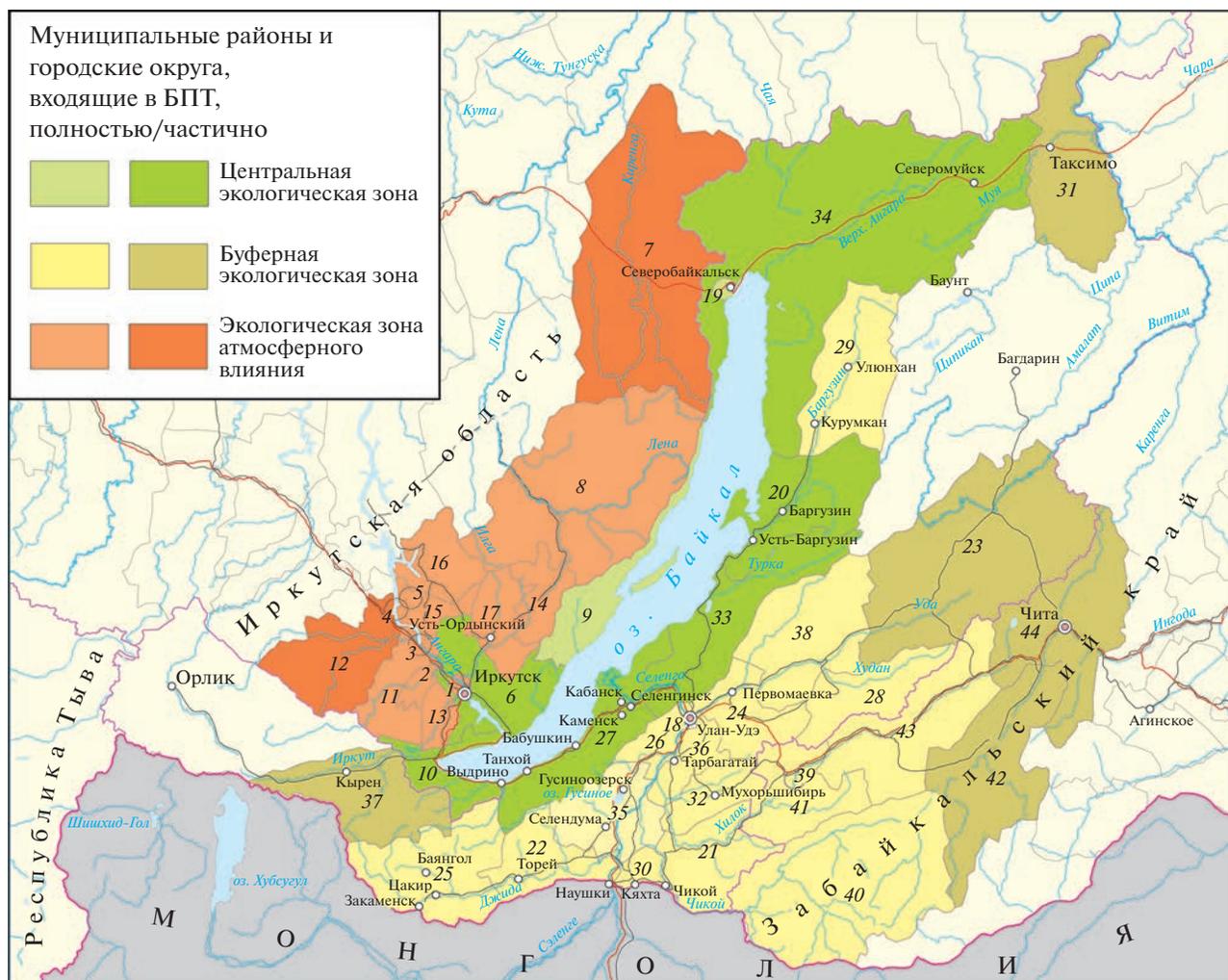
5. Интегральный индекс антропогенного воздействия (ИАВ) для каждого муниципального образования состоит из семи субиндексов, обозначенных в формуле (3):

$$\begin{aligned} \text{ИАВ} = & \left( \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4} \right) + \left( \frac{B_1 + B_2 + B_3}{3} \right) + \\ & + \left( \frac{C_1 + C_2}{2} \right) + \left( \frac{D_1 + D_2 + D_3}{3} \right) + \\ & + \left( \frac{E_1 + E_2}{2} \right) + \left( \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{4} \right) + \left( \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $A-L$  переменные (см. табл. 1) – нормированные значения, умноженные на вес фактора, определенного экспертами.

6. Особенности оценки по муниципальным образованиям (МО). В пределы БПТ попадает 43 МО (муниципальные районы – МР и городские округа – ГО). Из принципов выделения БПТ следует и еще одна важная для исследования особенность: в ее пределы входят все территории, которые могут оказывать влияние на экологическое состояние Байкала (за исключением расположенных за рубежом), ограниченные орографическими и прочими физико-географическими барьерами. С этих территорий в Байкал могут попадать загрязнения, используя различные каналы: преимущественно воздушные в зоне атмосферного влияния и водные в буферной зоне. Центральная зона же ограничивает территорию-реципиента воздействия, место концентрации природного наследия. Границы МО не всегда совпадают с границами зон БПТ. Больше подходят границы поселений, но даже они не всегда соотносятся с границами зон БПТ. Фактически можно исключить из рассмотрения муниципальные районы Улётовский Забайкальского края, Тункинский и Муйский Республики Бурятия, которые входят в буферную зону БПТ неизбежными частями или ООПТ (рис. 1).

В наибольшей степени границы БПТ совпадают с границами МО зоны атмосферного влияния: за пределами БПТ живет только 2.2% населения в Казачинско-Ленском районе и 25% населения Черемховского района, причем за пределами зоны нет источников АВ, нагрузка рассчитывалась для района в целом. В буферной зоне живет 34%



**Рис. 1.** Муниципальные образования в пределах Байкальской природной территории и ее экологических зон. 1 – ГО город Иркутск; 2 – ГО Ангарское МО; 3 – ГО город Усолье-Сибирское; 4 – ГО Черемховское МО; 5 – ГО Свирское МО; 6 – Иркутский МР; 7 – Казачинско-Ленский МР; 8 – Качугский МР; 9 – Ольхонский МР; 10 – Слюдянский МР; 11 – Усольский МР; 12 – Черемховский МР; 13 – Шелеховский МР; 14 – Баяндаевский МР; 15 – Боханский МР; 16 – Осинский МР; 17 – Эхирит-Булагатский МР; 18 – ГО город Улан-Удэ; 19 – ГО город Северобайкальский; 20 – МР Баргузинский; 21 – МР Бичурский; 22 – МР Джидинский; 23 – МР Еравнинский; 24 – МР Заиграевский; 25 – МР Закаменский; 26 – МР Иволгинский; 27 – МР Кабанский; 28 – МР Кижингинский; 29 – МР Курумканский; 30 – МР Кяхтинский; 31 – МР Муйский; 32 – МР Мухоршибирский; 33 – МР Прибайкальский; 34 – МР Северо-Байкальский; 35 – МР Селенгинский; 36 – МР Тарбагатайский; 37 – МР Тункинский; 38 – МР Хоринский; 39 – ГО город Петровск-Забайкальский; 40 – Красночикоийский МР; 41 – Петровск-Забайкальский МР; 42 – Улётовский МР; 43 – Хилокский МР; 44 – Читинский МР.

Составлено по: Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям / Росстат. <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282>; Карта Байкальской природной территории (Масштаб 1 : 1000000) проекта "Охрана озера Байкал" (<http://geol.irk.ru/baikal/>). Сайт создан по заказу МПР России и ведется под управлением Росприроднадзора).

населения Еравнинского района и всего 3.5% Читинского района (это только 2 сельских поселения Беклемишевское и Арахлейское). В этом случае показатели образования коммунальных отходов, водопотребления и стоков рассчитывались пропорционально численности населения, объемы выбросов от автономных систем отопления рассчитывались по отдельным населенным пунк-

там, нарушенные земли и выбросы от автотранспорта, фоновая нагрузка – в разрезе поселений, нагрузка на леса – по лесничествам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Покомпонентный анализ воздействия на окружающую среду, проведенный на первом этапе,*

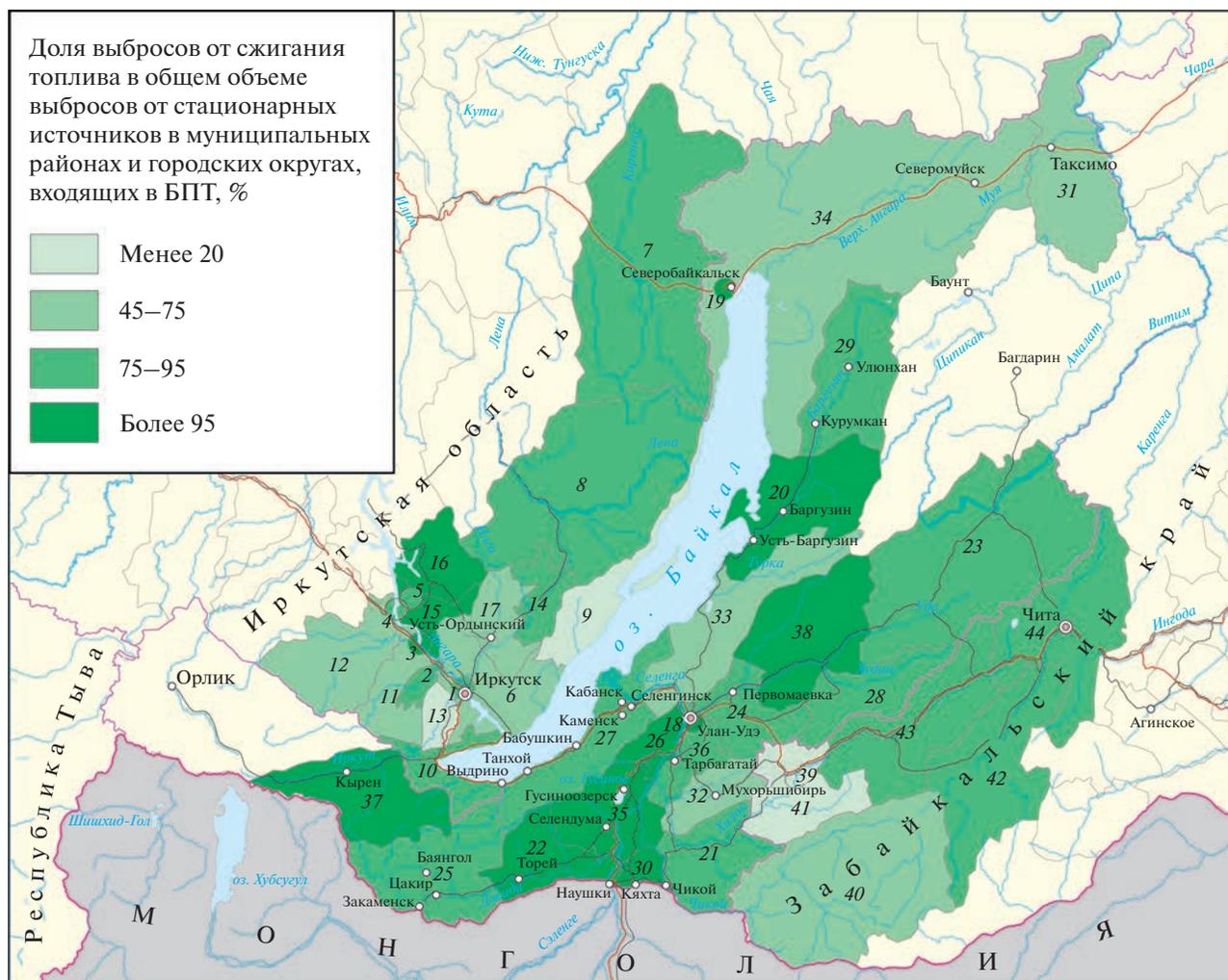


Рис. 2. Доля выбросов от сжигания топлива в валовом объеме выбросов в атмосферу от стационарных источников (без выбросов от автономных систем отопления). Экспликацию см. в подписи рис. 1.

показал, что МО в пределах БПТ сильно поляризуются по уровню воздействия на водные ресурсы и атмосферу: оно концентрируется в Иркутском и Селенгинском ареалах, при этом такая нагрузка здесь обусловлена производственными процессами, а в прочих сельских районах – потребностями населения.

В целом по территории БПТ автономные системы отопления наряду с централизованными системами энерго- и теплоснабжения являются доминирующим источником выбросов в большей части МО (рис. 2). Особенно ярко это проявляется в тех зонах, где в качестве топлива используется уголь, что наиболее характерно для индивидуальной жилой застройки. Как правило, это происходит в двух типах поселений: расположенных в непосредственной близости от предприятий по добыче угля и в относительно крупных поселках с высокими доходами населения, когда большие

дома выгоднее отапливать с помощью угольных котлов (рис. 3).

Для БПТ характерен высокий уровень концентрации населения и хозяйственной деятельности в нескольких крупных центрах, но в то же время отмечается и довольно высокая степень заселенности сельских районов южной части региона. Отдельным источником воздействия, характерным для прибрежной зоны Байкала, выступают туристы, в том числе неорганизованные. Факторы, определяющие соотношение постоянного и временного населения довольно разнообразны, и далеко не всегда определяются лишь природной сезонностью (Воробьев, 2020). Для мелких и мельчайших населенных пунктов ключевым фактором является положение в системе расселения. Наиболее сильно колеблется численность населения в сельских населенных пунктах, расположенных на периферии МР и не имеющих подъездных дорог, для которых характерно превыше-

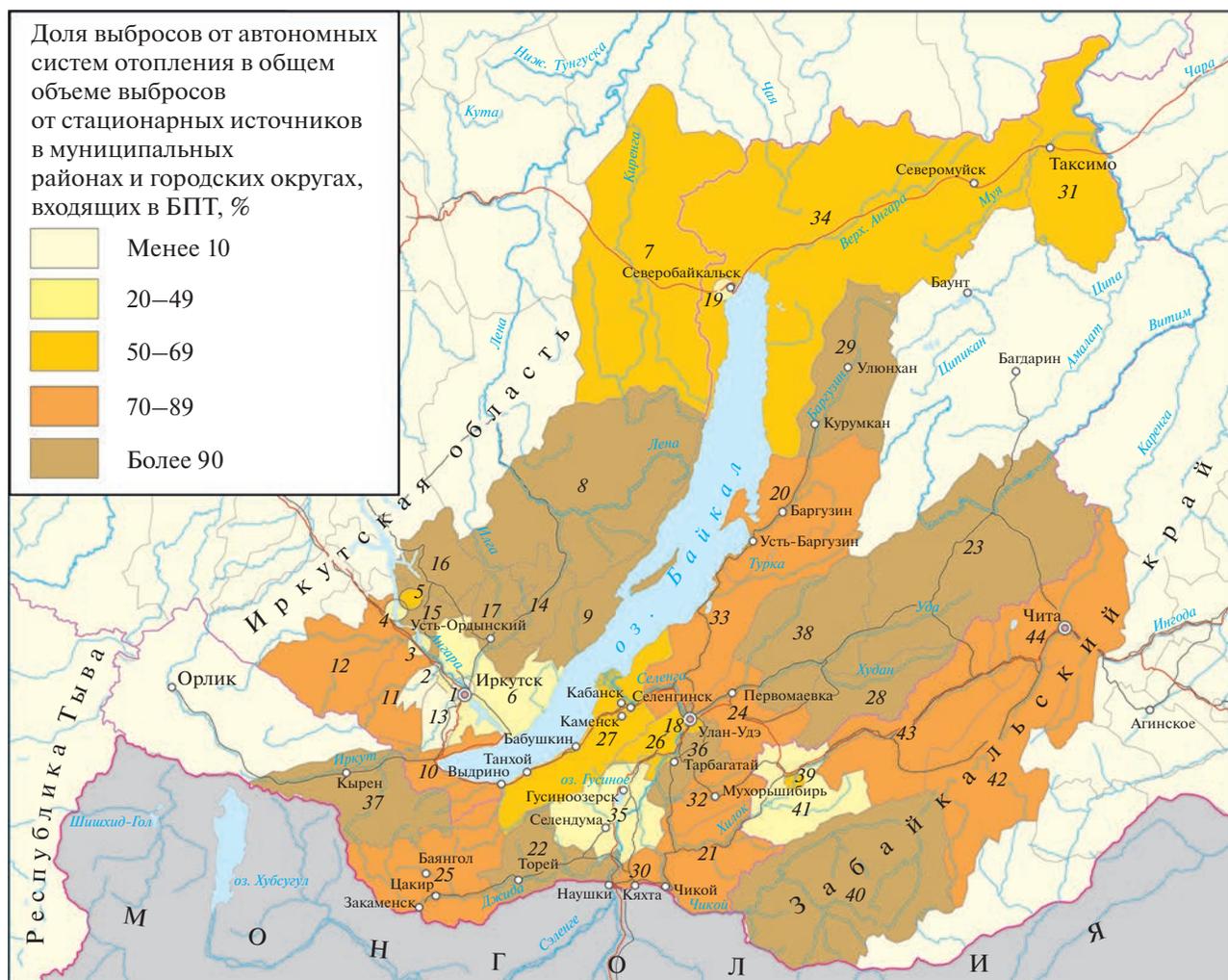


Рис. 3. Доля выбросов от автономных систем отопления, %. Экспликацию см. в подписи рис. 1.

ние летнего населения над зимним. В центрах МР, сельских поселений и крупных населенных пунктах с более благополучной социально-экономической ситуацией, по оценкам экспертов, как правило, достигается баланс между приезжающими в летний период городскими дачниками, и возвращающимися в зимний период вахтовиками и мигрантами-отходниками. В результате численность наличного населения (по данным опросов и интервью) отличается от зарегистрированного в меньшую сторону в среднем не более чем на 10%. В средних по размеру (300–700 чел.) сельских населенных пунктах превышение максимального (летнего) населения над зимним находится в пределах 20%.

Превышение же численности фактического населения над числом официально зарегистрированного характерно для пригородных районов региональных центров, где специфическая субурбанизация происходит прежде всего за счет снимающих жилье на длительный срок бывших сельских жите-

лей периферийных сельскохозяйственных районов. Хотя в настоящее время таких населенных пунктов в пределах собственно ЦЭЗ нет, но по мере развития транспорта и расширения зон влияния региональных центров появление их в перспективе исключить нельзя.

Общий тренд в развитии системы сельского расселения – поляризация, которая будет усиливаться за счет размывания относительно жизнеспособной группы средних по размеру пунктов и их перехода в категорию мелких (рис. 4). В результате, сезонные демографические колебания будут расти: численность постоянных жителей продолжит уменьшаться, а временного населения, как рекреантов, так и привлекаемого персонала в учреждениях отдыха, будет увеличиваться.

Население в настоящем ИАВ включено в блок “Фоновое воздействие”. При расчете индекса на муниципальном уровне вклад собственно населения не слишком велик, а его дифференциация по сезонам года не дает значительных различий в ин-

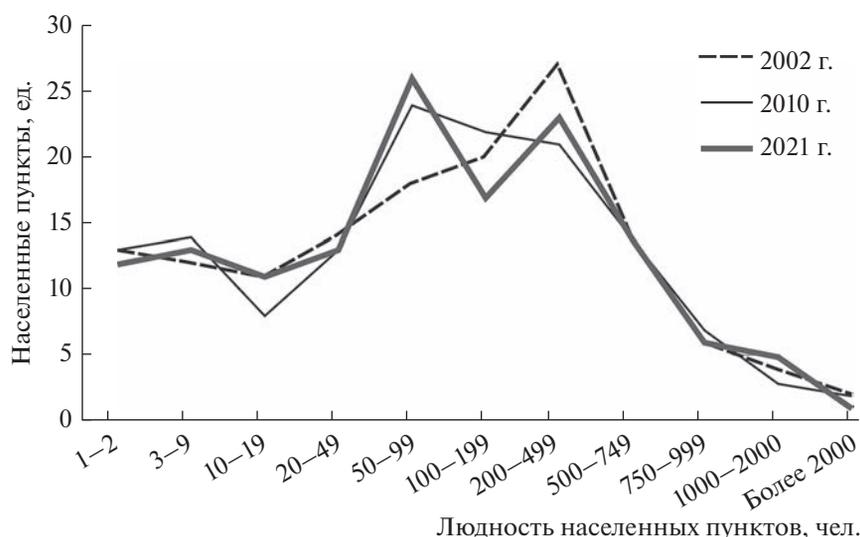


Рис. 4. Распределение населенных пунктов ЦЭЗ по численности населения в 2002, 2010 и 2021 гг.

дексе, поскольку перекрывается вкладом остальных компонент или косвенно учитывается через них, например, в объемах стоков. Роль населения должна усилиться при переходе на более крупный масштабный уровень в первую очередь для узкой прибрежной полосы, где концентрируется основная часть рекреантов.

Сельскохозяйственное воздействие на БПТ довольно велико и имеет наибольшее пространственное распространение, что обусловлено традиционными занятиями населения и характером расселения. Лесозаготовка в пределах БПТ ведется менее активно, чем в остальной Сибири, но

лесные ресурсы также являются объектом АВ, главными факторами становятся вырубki и лесные пожары. Показатели нагрузки на леса, несмотря на то что не все они имеют прямое отношение к антропогенным факторам, в некоторой степени ими обусловлены. Пожары 2015 г. сильнее затронули БПТ: выше всего доля пройденных пожарами лесов была в районах Бурятии, непосредственно примыкающих к Байкалу (в частности Кабанском), а также в районах Бурятии и Забайкальского края к югу, востоку и северу от муниципальных образований, входящих в БПТ. Пожары 2019 г. БПТ почти не затронули (основные очаги были

Таблица 2. Основные социально-экономические показатели по типам муниципальных образований БПТ в 2020 г.

Тип	Постоянное население		Объем отгруженных товаров и услуг, произведенных собственными силами		Объем производства продукции сельского хозяйства	
	тыс. человек	%	млрд руб.	%	млн руб.	%
1	1067.5	42.1	512658.6	63.7	6094.4	10.7
1а	986.7	38.9	457623.5	56.8	3719.7	6.5
1б	80.8	3.2	55035.1	6.8	2374.6	4.2
2	840.2	33.1	240817.5	29.9	14447.8	25.3
2а	557.8	22.0	198392.6	24.6	1903.2	3.3
2б	176.0	6.9	16267.4	2.0	3989.8	7.0
2в	106.4	4.2	26157.5	3.2	8554.7	15.0
3	143.4	5.7	18750.8	2.3	21395.1	37.4
4	391.5	15.4	28826.6	3.6	11981.2	21.0
5	94.3	3.7	4168.2	0.5	3265.0	5.7
Всего	2536.9	100.0	805221.7	100.0	57183.5	100.0

Источник: Росстат, БДПМО.

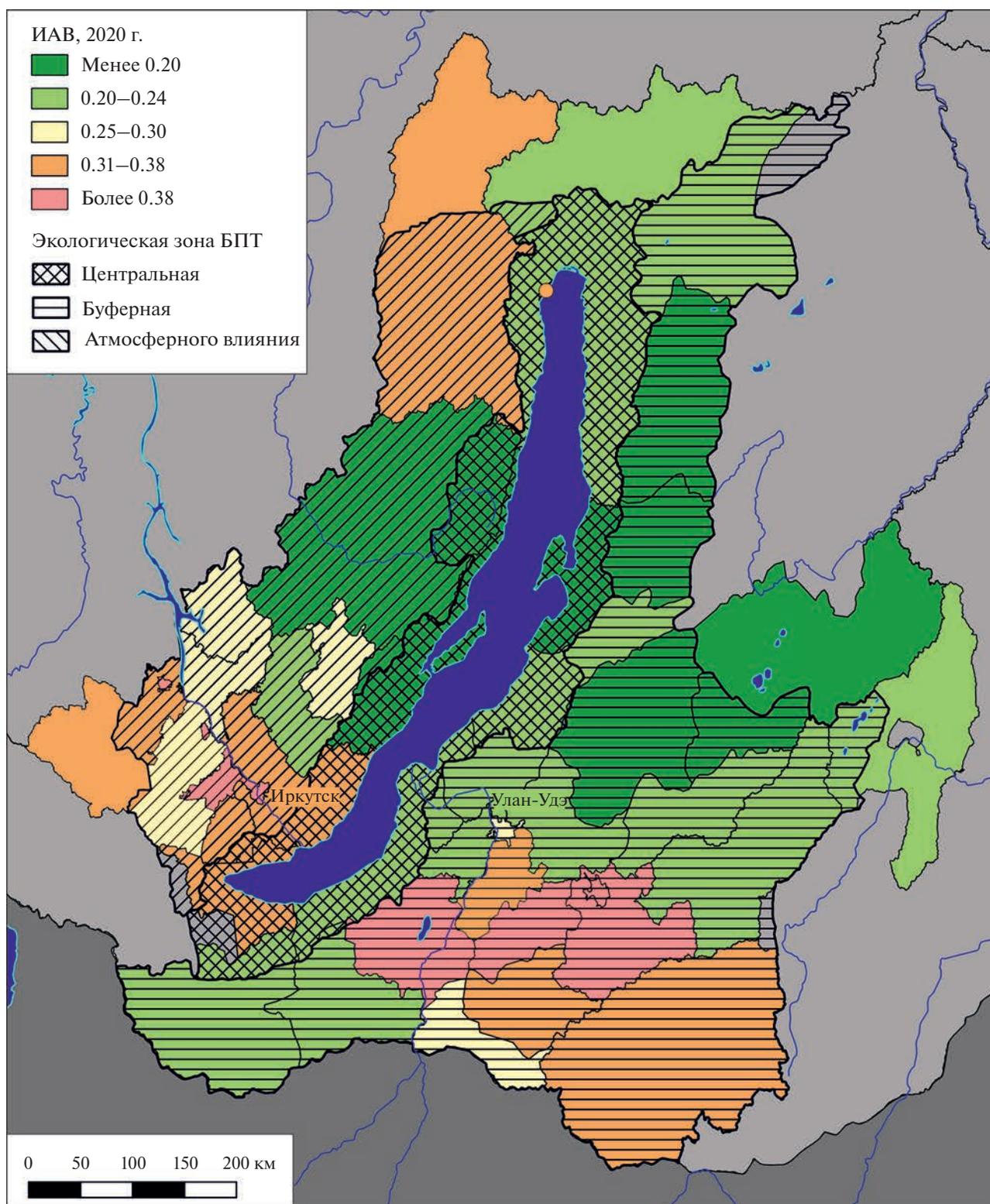


Рис. 5. Интегральный индекс антропогенного воздействия по муниципальным образованиям БПТ в 2020 г.

севернее, на севере Иркутской области и в Якутии). Из числа муниципальных районов, выходящих непосредственно к Байкалу, под ударом оказался Северобайкальский район Бурятии. Пози-

ции районов-лидеров по данному показателю очень нестабильны и во многом зависят от случайных факторов. Четких тенденций не выделяется, в том числе и в результате неточностей под-

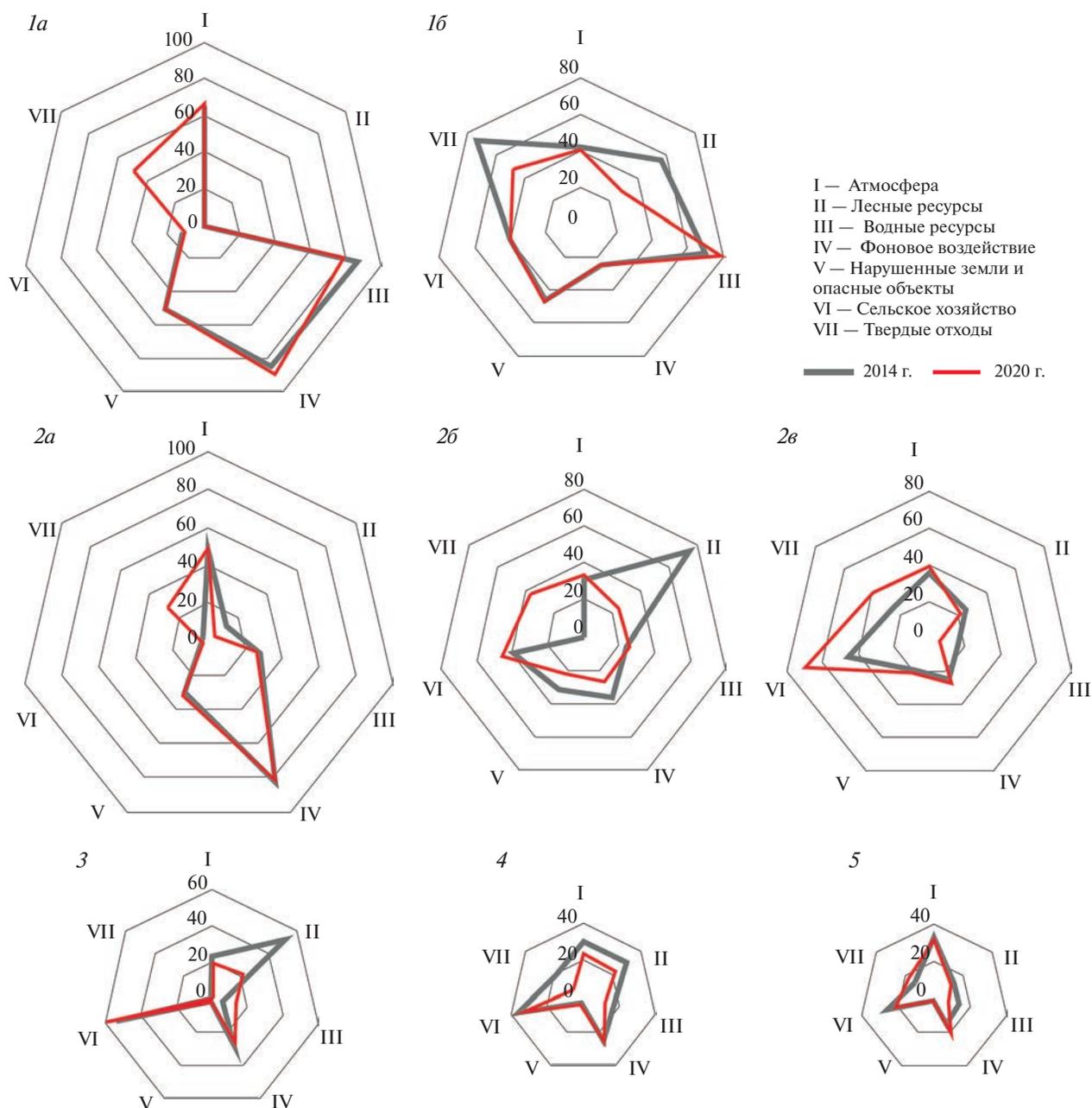


Рис. 6. Типы и подтипы муниципальных образований по структуре ИАВ, 2014 и 2020 гг.

счета в отдельные годы (иногда определяется визуально сотрудниками лесничеств).

**Интегральная оценка уровня АВ** позволила построить рейтинг муниципальных образований. По значениям интегрального индекса выделено пять основных типов муниципальных образований, по структуре ИАВ выделяются подтипы (рис. 5, 6).

Тип 1 объединяет наиболее крупные по численности населения и объемам промышленного производства муниципалитеты, в которых высокое значение ИАВ (более 0.38) достигается за счет

повышенных значений большей части видов нагрузки на среду. Он представлен двумя подтипами, различающимися по структуре расселения и географии входящих в них муниципальных образований. Высокий уровень АВ, как правило, приурочен к размещению крупных производств и крупным формам расселения. В МО первого типа концентрируется 64% промышленной продукции и 42% постоянного населения БПТ (табл. 2).

Высокий уровень АВ, как правило, связан с достаточно равномерной структурой ИАВ. Внутри индекса вклад большинства субиндексов ста-

новится примерно равным, поскольку для высокого уровня АВ характерны высокие значения почти всех частных индикаторов. Но для БПТ характерно формирование высокого уровня ИАВ для двух совершенно разных типов территорий.

*Подтип 1а* образуют крупные городские округа (Иркутск, Ангарск, Черемхово, Усолье-Сибирское) в пределах Иркутско-Ангарской агломерации, расположенные вдоль транспортного коридора, осями которого выступают Транссибирская магистраль и верхнее течение р. Ангара. Здесь отмечаются наиболее высокие значения субиндексов воздействия на атмосферу, водные объекты, имеются значительные площади нарушенных земель, отмечается сильное фоновое воздействие на окружающую среду за счет высокой численности населения.

В *подтип 1б* входят три муниципальных района в разных частях БПТ (Селенгинский, Петровск-Забайкальский, Мухоршибирский), на территории которых имеются довольно крупные источники воздействия на окружающую среду – угольные разрезы, горнодобывающие предприятия цветной металлургии, предприятия тепловой энергетики. Особенность *подтипа 1б* – заметное влияние на окружающую среду сельскохозяйственной деятельности и более высокие значения субиндекса воздействия на лесные ресурсы.

Тип 2 с повышенным уровнем АВ включает муниципалитеты с весьма высоким значением ИАВ (0.3–0.38), обусловленным наличием отдельных крупных источников воздействия на окружающую среду и, напротив, сниженным влиянием других групп факторов. В муниципалитетах данного типа проживает 33% населения БПТ, производится 30% промышленной и 25% сельскохозяйственной продукции. В зависимости от особенностей источника тип делится на три подтипа:

*Подтип 2а* – городские муниципалитеты, имеющие за счет численности населения повышенное фоновое воздействие на среду, со средними значениями субиндекса воздействия на атмосферу и водные ресурсы. Это городские округа и муниципальные районы, в которых есть город (ГО Улан-Удэ, ГО Северобайкальск, Шелеховское МО, ГО Петровск-Забайкальский, ГО Свирск).

Данные муниципалитеты небольшие по площади, имеют высокий уровень централизованного тепло- и электроснабжения на угольном топливе. Для Северобайкальска и Петровска-Забайкальского объем выбросов в атмосферу не превышает 3 тыс. т при высокой доле выбросов от сжигания топлива, но существенный вклад вносят индивидуальные системы отопления. В Шелеховском районе объем выбросов в атмосферу составляет около 40 тыс. т, но поскольку основные источники – это Иркутский алюминиевый

завод, ЗАО “Кремний”, ООО “СУАЛ-ПМ”, то технологически обусловлено преобладание (более 3/4) в структуре выбросов окиси углерода СО (Государственный ..., 2021). При этом из-за низкой стоимости электроэнергии большая часть индивидуальных жилых строений имеет электрообогрев. У всех трех городов – средний объем сточных вод (2–5 млн м<sup>3</sup>), но доля загрязненных вод близка к 100%. Объем водопотребления также на среднем уровне, в структуре преобладает хозяйственно-питьевое. Исключение составляет Шелеховский район, где объем водопотребления крайне мал (около 25 тыс. м<sup>3</sup>) при самом высоком уровне оборотного водопотребления. Таким образом, относительно меньшее влияние водного фактора компенсируется большим уровнем атмосферного загрязнения.

Но главным фактором остается фоновое воздействие, обусловленное высокой плотностью населения, застройки, плотностью дорожной сети, высоким уровнем автомобилизации.

*Подтип 2б* – муниципальные районы с повышенным фоновым воздействием на среду (Иркутский) или имеющие значительные площади нарушенных земель (Слюдянский). Эти два района – прибрежные, в значительной своей части попадающие в ЦЭЗ, с высокой долей сезонного населения. Есть общие факторы формирования АВ: атмосферное загрязнение во многом определяется автомобильным транспортом и маломерными судами, в меньшей степени – котельными и печами в индивидуальных жилых строениях, которые используют в основном электроэнергию от ГЭС. Однако есть в структуре индекса и существенные различия: для Иркутского района характерна высокая нагрузка на леса, в Слюдянском она низкая. Обратная ситуация наблюдается с нагрузкой на водные ресурсы. В Иркутском МР оборотное водоснабжение отсутствует, но объемы водопотребления и стоков незначительные, большая часть этого объема очищается физико-химическими методами (89.5 тыс. м<sup>3</sup>).

*Подтип 2в* – довольно заселенные сельские районы со сравнительно высоким уровнем развития сельского хозяйства (Бичурский, Тарбагатайский, Черемховский), а также периферийные Красночикоийский и Казачинско-Ленский районы с заметной ролью горнодобывающих производств в загрязнении среды. Вклад данных муниципальных образований в объем сельскохозяйственной продукции в 5 раз больше, чем их доля в объемах промышленного производства, и почти в 4 раза больше, чем в численность населения. Кроме сельского хозяйства в данных районах развита добывающая промышленность. В Бичурском районе ООО “Угольный разрез” разрабатывает Окино-Ключевское бурогольное месторождение, основным потребителем которого является

Гусиноозерская ГРЭС. В том числе по этой причине Бичурский район находится на третьем месте в БПТ по объему твердых отходов, который превышает 13 млн т. В Черемховском районе добывается 18% угля Иркутской области (в том числе 50% каменного угля) и производится 100% объема переработки каменного угля и производства угольного концентрата. Котельные и частный сектор района в основном используют уголь, за исключением отдаленных населенных пунктов. Поэтому ИАВ значительной части муниципальных образований находится скорее в зависимости от объемов промышленного производства, даже для тех районов, где вклад сельского хозяйства велик, как в объемы производства, так и в интегральный индекс воздействия.

Красночикойский район выделяется воздействием на водные ресурсы и накопленными твердыми отходами (четвертое место среди МО БПТ с объемом более 10 млн т) в результате деятельности небольших добывающих предприятий (основная нагрузка формируется за счет золотодобычи в ряде старательских артелей), угольного разреза (АООТ “Разрез Зашуланский”, АОЗТ “Турмалхан”), а также разрабатываемого Малханского месторождения цветного турмалина. В Казачинско-Ленском районе основное антропогенное воздействие на водные и лесные ресурсы формируется в результате реализации проекта строительства газопровода “Сила Сибири”. Однако строительство газопровода пока мало отражается в статистических показателях: объемы выбросов в атмосферу практически не выросли, поскольку вахтовые рабочие размещаются либо в гостиничном фонде, многоквартирных домах, подключенных к централизованному отоплению (как, например, в п. Магистральный), либо в специальных вахтовых поселках; зарегистрирован на других территориях; объемы отходов увеличились, поскольку поселки заключают договоры с региональным оператором на вывоз отходов, их прирост находит отражение в статистике. Выросли объемы водопотребления.

*Средний уровень АВ* выявлен в небольшом числе сельских районов и малых городах с воздействием сельского и лесного хозяйства (тип 3). Данный тип (значения ИАВ 0.265–0.281) образуют более сельские муниципалитеты с сохранившимся сельским хозяйством: пригородные Усольский и полупериферийный Кяхтинский, а также районы Усть-Ордынского округа – Баяндаевский, Боханский, Осинский. В Кяхтинском районе все показатели аграрной нагрузки находятся на уровне, немного превышающем медианный, включая плотность поголовья скота. В Усольском районе высокая аграрная нагрузка формируется в результате деятельности четырех достаточно крупных предприятий интенсивного

сельского хозяйства. Крупнейшее из них – СХОАО “Белореченское”, частично располагающееся и в Черемховском районе, СХПК “Усольский свинокомплекс” имеет поголовье в 108 тыс. голов, есть и другие крупные комплексы, специализирующиеся на производстве молока, мяса и картофеля. В менее развитых Боханском и Осинском районах второй по значимости вид воздействия – фоновый, в Баяндаевском несколько повышено воздействие на водные ресурсы.

*Пониженный уровень АВ* формируется в основном в полупериферийных и некоторых пригородных районах с развитым сельским хозяйством (тип 4). Это муниципалитеты с близкими небольшими значениями по большинству субиндексов; для полупериферийных муниципалитетов основную роль играет АВ на лесные ресурсы, для пригородных – аграрное и фоновое при отсутствии опасных объектов и, как следствие, больших массивов нарушенных земель, высоких объемов образования твердых отходов (в Иволгинском и Читинском (часть, входящая в БПТ) районах). В более плотно заселенных Прибайкальском и Иволгинском районах также несколько выше доля загрязнения от автономных систем отопления. В Северобайкальском районе имеются накопленные твердые отходы, образовавшиеся в результате разведывательного бурения Холоднинского месторождения свинцово-цинковых руд (Воробьевская и др., 2018). В Хилокском, Джидинском и Заиграевском районах в структуре индекса заметен ущерб, нанесенный лесным ресурсам в результате нерациональной их эксплуатации.

Кабанский район, несмотря на наличие на его территории целлюлозно-картонного комбината, также выделяется в основном сельскохозяйственным и фоновым воздействием в результате жизнедеятельности населения и рекреации. ОАО “Селенгинский целлюлозно-картонный комбинат” (СЦКК) – относительно небольшое по масштабам отрасли предприятие (400 тыс. т картона в год), его опасность заключается в размещении на границе ЦЭЗ, на берегу р. Селенги. Однако уровень АВ в районе оценивается как умеренный, поскольку самое основное достижение СЦКК – создание системы замкнутого водооборота. Это позволило прекратить сброс сточных вод в Селенгу и исключить загрязнение минеральными веществами, сократить потребление чистой воды на производстве с 5.6 до 3.3 млн м<sup>3</sup>/год, уменьшить расход сульфата натрия при производстве целлюлозы со 120 до 20 кг/т. Загрязнение воздуха остается достаточно существенным, поселок Селенгинск включен в список приоритетных городов нацпроекта “Чистый воздух”. Однако ареал загрязнения, как правило, не дотягивается до поселка, простираясь до железной дороги; к тому же объем выбросов загрязняющих веществ СЦКК постепенно сокращается: если в 2006 г. он состав-

лял 3.2 тыс. т, то в 2020 г. — 2.7 тыс. т. Все же при всех положительных тенденциях выбросы сероуглерода и формальдегида в выбросах комбината не сокращаются.

*Низкий уровень АВ* характерен для полупериферийных или периферийных муниципальных образований с минимальными значениями ИАВ (0.148–0.196), на которые приходится менее 4% жителей БПТ, около 6% сельскохозяйственной и всего 0.5% промышленной продукции (тип 5). Для них характерны умеренные и близкие значения субиндексов фонового воздействия и сельскохозяйственной деятельности. При этом отдельные районы могут выделяться более высокой нагрузкой на отдельные компоненты среды: Еравнинский — за счет крупного карьера на месторождении плавикового шпата, Качугский — в результате воздействия на водные ресурсы в процессе добычи золота. Для большинства районов этого типа характерна также относительно высокая доля загрязнения атмосферы от автономных систем отопления.

## ВЫВОДЫ

Разработанная методика интегральной оценки АВ позволила оценить уровень воздействия за период 2014–2020 гг. и впервые рассмотреть все муниципальные районы в едином рейтинге, вне региональных границ. Анализ результатов рейтинга подтвердил качество методики интегральной оценки и показал, что районы и города БПТ сильно поляризованы по уровню антропогенного воздействия, концентрирующегося в отдельных ареалах, в первую очередь в зоне атмосферного влияния. Тем не менее за ее пределами также отмечаются отдельные очаги АВ, а обширные сельские территории оказывают среднеинтенсивное фоновое воздействие, обусловленное ведением сельского и лесного хозяйства. В наибольшей степени локализованы нарушенные земли, объекты накопленного вреда, в то время как сельское и лесное хозяйство создают общий фон нагрузки. Водное и атмосферное загрязнение из-за значительных колебаний численности населения в МО и особенностей учета печного топлива официальной статистикой недооценено на 50%.

Рейтинг МО мало меняется по годам. Различия между буферной зоной и зоной атмосферного загрязнения постепенно снижаются, поскольку на западном берегу озера снижается воздействие крупнейших источников, ликвидируются объекты накопленного вреда, а в буферной зоне АВ на леса, нарушенные земли и даже выбросы немного растут. Отсутствие позитивных изменений в экологическом состоянии говорит о необходимости принятия мер по снижению уровня воздействия, в первую очередь в крупнейших центрах, экологическая обстановка в которых по-прежнему

остается неблагоприятной. Совершенствование мониторинга АВ на атмосферу остро нуждается в расширении перечня разрабатываемых на регулярной основе показателей, в том числе для уровня поселений.

Совершенствование мониторинга АВ остро нуждается в *улучшении статистического обеспечения*, в частности необходимо:

- раскрытие нефинансовой информации предприятий, в частности статистической отчетности о масштабах загрязнения, уровнях очистки выбросов в атмосферу, сточных вод и утилизации разных видов отходов. Открытость статистики в разрезе предприятий хотя бы по запросу органов, ответственных за проведение мониторинга, позволит верифицировать динамику суммарных показателей, объяснить их изменения и главное — более качественно учесть воздействия в границах локальных зон БПТ, которые не всегда совпадают с границами муниципальных образований и даже поселенческого уровня;

- расширение перечня разрабатываемых на регулярной основе показателей, в том числе для уровня поселений (городских и сельских), в частности — о количестве твердых коммунальных отходов, реально вывозимых с территории поселения. Для расчета выбросов от нерегистрируемых источников выбросов требуется статистика о числе домовладений по поселениям;

- улучшение качества сельскохозяйственной статистики, поскольку данные об объемах вносимых органических удобрений муниципальные образования учитывают через стандартный норматив — 20 т/га посевных площадей;

- улучшение качества статистики по лесному хозяйству, поскольку в ряде муниципальных образований (лесничеств) документы лесоустройства не обновлялись десятилетиями и устарели;

- ввести показатель площади нарушенных земель в список индикаторов, представляемых на муниципальном уровне, а не только на региональном.

Важным достоинством представленного алгоритма является возможность его применения в будущем для отслеживания тенденций изменения экологической ситуации и формирования приоритетов внутрирегиональной экологической политики.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта № 8/Д-2021 “Разработка интегрированной (интегральной) оценки антропогенного воздействия и состояния окружающей среды озера Байкал”, НИР ГЗ МГУ кафедры экономической и социальной географии России № 121051100161-9 “Современная динамика и факторы социально-экономического развития регионов и го-

родов России и стран Ближнего Зарубежья”, кафедры геоморфологии и палеогеографии № 121040100323-5 “Эволюция природной среды в кайнозой, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования”.

#### FUNDING

This research was performed according to the project no. 8/D-2021 “Development of an integrated assessment of anthropogenic impact and the state of the environment of Lake Baikal,” Research Work of the Department of Economic and Social Geography of Russia of Moscow State University no. 121051100161-9 “Modern dynamics and factors of socio-economic development of regions and cities of Russia and neighboring countries,” Department of Geomorphology and Paleogeography of Moscow State University no. 121040100323-5 “Evolution of the natural environment in the Cenozoic, relief dynamics, geomorphological hazards and risks of nature management.”

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова А.Ю., Бобылев С.Н., Соловьёва С.В., Ховавко И.Ю.* Сверхтуризм на Байкале: проблемы и пути решения // География и природные ресурсы. 2021. № 3. С. 73–84.
- Байкал: природа и люди: энциклопедический справочник / Байкальский институт природопользования СО РАН / отв. ред. А.К. Тулохонов. Улан-Удэ: ЭКОС, 2009. 608 с.
- Байкальский регион: общество и природа. Атлас. 2021. 320 с.
- Бандман М.К.* Территориально-производственные комплексы: теория и практика предплановых исследований. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1980. 254 с.
- Битюкова В.Р.* Экономико-географическая оценка экологических последствий трансформации отраслевой структуры хозяйства регионов и городов России в 2000–2020 гг. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 3. С. 1–19.
- Бобылев С.Н., Минаков В.С., Соловьёва С.В., Третьяков В.В.* Эколого-экономический индекс регионов РФ. Методика и показатели для расчета. М.: WWF России, РИА Новости, 2012. 150 с.
- Бобылев С.Н., Порфирьев Б.Н.* Устойчивое развитие крупнейших городов и мегаполисов: фактор экосистемных услуг // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 6: Экономика. 2016. № 6. С. 3–21.
- Винокуров М.А., Суходолов А.П.* Экономика Иркутской области. В 6 т. Т. 5. Иркутск: Байкальский гос. ун-т экономики и права, 2008. 291 с.
- Владимиров И.Н., Корытный Л.М., Плюсин В.М., Сороковой А.А.* Исследования Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН на Байкальской природной территории // География и природные ресурсы. 2016. № 55. С. 6–14.
- Волошинская А.А., Акимова В.В.* Устойчивое развитие города и индикаторы для его измерения в целях стратегического планирования // Гос. управление. Электрон. Вестн. 2022. № 93. С. 45–57.
- Воробьёв А.Н.* Большие данные в изучении локализации и мобильности населения // География и природные ресурсы. 2020. № 55. С. 203–207.
- Воробьевская Е.Л., Кириллов С.Н., Слипечук М.В., Тульская Н.И., Устьянцев А.В., Цымбал М.Н.* Оценка влияния Холоднинского полиметаллического месторождения на водные объекты Северного Прибайкалья // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 12. С. 68–73.
- Государственный доклад “О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2020 году”. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2021. 360 с.
- Добролюбова Ю.С.* Обзор зарубежных социально-экологических рейтингов городов и их сравнение с российскими аналогами // Региональные исследования. 2015. № 4. С. 65–75.
- Долгих Е.И., Антонов Е.В.* Рейтинг устойчивого развития российских городов // Демоскоп Weekly. 2015. № 631–632.
- Евстропьева О.В.* Региональные эффекты развития международной и национальной системы туризма (на примере Байкальского региона): Дис. ... д-ра геогр. наук. Иркутск, 2021.
- Касимов Н.С., Битюкова В.Р., Малхазова С.М., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М., Шартова Н.В., Власов Д.В., Тимонин С.А., Крайнов В.Н.* Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / под ред. Н.С. Касимова. М., 2014. 560 с.
- Мухина Л.И., Рунова Т.Г.* О логике изучения географических аспектов взаимодействия в системе “население–хозяйство–природа” // Изв. РАН. Сер. геогр. 1977. № 4. С. 54–68.
- Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: ИГ СО РАН, 2015. 145 с.
- City Prosperity Initiative Index: Using AHP Method to Recalculate the Weights of Dimensions and Sub-Dimensions in Reference to Tehran Metropolis by Parsa Arbab // European J. Sustainable Dev. 2017. Vol. 6. № 4. P. 289–301.
- Environmental Sustainability Index // An Initiative of the Global Leaders of Tomorrow Environment Task Force, World Economic Forum Annual Meeting. Davos, Switzerland, 2001. 255 p.
- Index of Human Progress // Human Development Report Office, 2014. 120 p.
- Sustainable Cities Index 2015. Balancing the economic, social and environmental needs of the world’s leading cities. Arcadis, 2015.
- The Green City Index. A research project conducted by the Economist Intelligence Unit, sponsored by Siemens. Siemens AG Corporate Communications and Government Affairs, Munich, Germany, 2012.
- UN–Habitat (United Nations Human Settlements Programme). State of the world’s cities 2017/2018: Prosperity of cities. NY: Routledge, 2018.
- World’s best cities: A Ranking of Global Place Equity // Resonance, 2019.

## Integral Assessment of Anthropogenic Impact on the Baikal Natural Territory: Methodological Approaches and Typology of Municipal Units

E. V. Antonov<sup>1, 2, \*</sup>, Yu. R. Belyaev<sup>1, \*\*</sup>, V. R. Bitukova<sup>1, \*\*\*</sup>, A. V. Bredikhin<sup>1, \*\*\*\*</sup>,  
V. S. Dehnic<sup>3, \*\*\*\*\*</sup>, E. A. Eremenko<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>, N. A. Koldobskaya<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>,  
O. E. Prusikhin<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>, and S. G. Safronov<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Moscow State University, Branch in Kazakhstan, Astana, Kazakhstan

\*e-mail: antonovmtg@inbox.ru

\*\*e-mail: yrbel@mail.ru

\*\*\*e-mail: v.r.bitukova@geogr.msu.ru

\*\*\*\*e-mail: avbredikhin@yandex.ru

\*\*\*\*\*e-mail: vodo.ast@gmail.com

\*\*\*\*\*e-mail: eremenkoeaig@gmail.com

\*\*\*\*\*e-mail: koldobskayana@yandex.ru

\*\*\*\*\*e-mail: olegprus2000@mail.ru

\*\*\*\*\*e-mail: saffff@mail.ru

The article developed an algorithm for the integral assessment of anthropogenic impact (AI) with spatial discreteness for municipalities of the Baikal Natural Territory (BNT). It includes 21 normalized indicators for the 2014–2020 period, aggregated into 7 sub-indices (impact on the atmosphere, water, forest resources, agricultural impact, solid waste, disturbed lands and objects of accumulated harm, as well as background impact). To determine the weight of the indicators, a survey was conducted of experts representing the scientific community (specialists in the field of integrated assessments of certain types of impacts or in the field of environmental problems of the BNT), the expert community (leading rating agencies) and representatives of the environmental management system of the regions included in the BNT. The integral indicator made it possible to build a rating of municipalities and identify key factors in the formation of the environmental situation. According to the integral index, five types of territories are identified, subtypes are distinguished by the nature of the impact on the environment. A high level of AI is typical for large cities and localities of enterprises, especially mining, in which a full set of load components operates. The increased level is observed in cities, suburban municipalities with a high burden from the vital activity of the population, as well as in large agricultural areas with a developed extractive industry. The average level of AI is typical for a small number of rural areas and small towns due to the load from agriculture and forestry. The reduced level of impact is formed mainly in semi-peripheral areas, where the load on forest resources plays a special role, and some suburban areas with more developed agriculture. A low level of AI is typical for peripheral, sparsely populated municipal units with a noticeable proportion of pollution from heating oil in residential housing. For BNT, a special role in the formation of the ecological situation is played by large tracts of disturbed land, high volumes of solid waste generation and objects of accumulated damage left over from the period of Soviet industrialization.

**Keywords:** integral index, anthropogenic impact, complex assessment, Baikal, Central ecological zone, Baikal Natural Territory

### REFERENCES

- Aleksandrova A.Yu., Bobilev S.N., Solovyova S.V., Khovavko I.Yu. Overtourism at Baikal: Problems and ways of addressing them. *Geogr. Nat. Resour.*, 2021, vol. 42, no. 3, pp. 248–257.
- Baikal: priroda i lyudi: entsiklopedicheskiy spravochnik* [Baikal: Nature and People: An Encyclopedic Reference Book]. Tulokhonov A.K., Ed. Ulan-Ude: EKOS Publ., 2009. 608 p.
- Baikalskii region: obshchestvo i priroda. Atlas* [Baikal Region: Society and Nature. Atlas]. 2021. 320 p.
- Bandman M.K. *Territorial'no-proizvodstvennye komplekсы: teoriya i praktika predplanovykh issledovaniy* [Territorial Production Complexes: Theory and Practice of Planned Research]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1980. 254 p.
- Bitukova V.R. Environmental Consequences of the Transformation of the Sectoral Structure of the Economy of Russian Regions and Cities in the Post-Soviet Period. *Reg. Res. Russ.*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 96–111.
- Bobilev S.N., Minakov V.S., Solov'eva S.V., Tret'yakov V.V. *Ekologo-ekonomicheskii indeks regionov RF* [Ecological and Economic Index of the Regions of the Russian Federation]. Moscow: WWF Rossii, RIA Novosti, 2012. 152 p.
- Bobilev S.N., Porfir'ev B.N. Sustainable development of the largest cities and megacities: the ecosystem services

- factor. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 6: Eko.*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 3–21. (In Russ.).
- City Prosperity Initiative Index: Using AHP Method to Recalculate the Weights of Dimensions and Sub-Dimensions in Reference to Tehran Metropolis by Parsa Arbab. Eur. J. Sustain. Dev.*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 289–301.
- Dobrolyubova Yu.S. Review of foreign socio-environmental ratings of cities and their comparison with Russian counterparts. *Reg. Issled.*, 2015, no. 4, pp. 65–75. (In Russ.).
- Dolgih E.I., Antonov E.V. *Reiting ustoichivogo razvitiya Rossiiskikh gorodov* [Rating of Sustainable Development of Russian Cities]. Demoskop Weekly, 2015, nos. 631–632. <http://www.demoscope.ru/weekly/2015/0631/demoscope631.pdf>.
- Ekologicheskii atlas basseina ozera Baikal* [Ecological Atlas of Lake Baikal Basin]. Irkutsk: IG SO RAN Publ., 2015. 145 p.
- Environmental Sustainability Index*. An Initiative of the Global Leaders of Tomorrow Environment Task Force, World Economic Forum Annual Meeting. Davos, Switzerland, 2001. 255 p.
- Evstrop'eva O.V. Regional effects of the development of the international and national tourism system on the example of the Baikal region. *Doc. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Irkutsk, 2021.
- Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii ozera Baikal i merakh po ego okhrane v 2020 godu"* [State Report On the State of Lake Baikal and Measures for its Protection in 2020]. Irkutsk: Inst. geogr. im. V.B. Sochavy SO RAN, 2021. 360 p.
- Index of Human Progress*. Human Development Report Office, 2014. 120 p.
- Kasimov N.S., Bitukova V.R., Malhazova S.M., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M., Shartova N.V., Vlasov D.V., Timonin S.A., Krajnov V.N. *Regiony i goroda Rossii: integral'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya* [Regions and Cities of Russia: Integrated Assessment of the Ecological State]. Kasimov N.S., Ed. Moscow, 2014. 560 p.
- Mukhina L.I., Runova T.G. About the logic of studying geographical aspects of interaction in the system "population–economy–nature." *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1977, no. 4, pp. 54–68. (In Russ.).
- Sustainable Cities Index 2015*. Balancing the economic, social and environmental needs of the world's leading cities. Arcadis, 2015.
- The Green City Index*. A research project conducted by the Economist Intelligence Unit, sponsored by Siemens. Siemens AG Corporate Communications and Government Affairs, Munich, Germany, 2012.
- UN–Habitat (United Nations Human Settlements Programme)*. State of the world's cities 2017/2018: Prosperity of cities. New York: Routledge, 2018.
- Vinokurov M.A., Sukhodolov A.P. *Ekonomika Irkutskoi oblasti* [Economy of the Irkutsk Oblast]. Irkutsk: Baikal. Gos. Univ. Ekon. i Prava, 2008. 291 p.
- Vladimirov I.N., Korytnyi L.M., Plyusnin V.M., Sorokovoi A.A. Research of the V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS on the Baikal Natural Territory. *Geogr. Prir. Resur.*, 2016, no. 5, pp. 6–14. (In Russ.).
- Voloshinskaya A.A., Akimova V.V. Sustainable development of the city and indicators for its measurement for strategic planning purposes. *Gos. Upravlenie. Elektronnyi Vestn.*, 2022, no. 93, pp. 45–57. (In Russ.).
- Vorob'ev A.N. Big data in the study of localization and mobility of the population. *Geogr. Prir. Resur.*, 2020, no. S5, pp. 203–207. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2020-5\(203-207\)](https://doi.org/10.21782/GiPR0206-1619-2020-5(203-207))
- Vorob'evskaya E.L., Kirillov S.N., Slipenchuk M.V., Tul'skaya N.I., Ust'yantsev A.V., Cymbal M.N. Assessment of the impact of the Kholodninsky polymetallic deposit on the water bodies of the Northern Baikal region. *Ekologiya i Promyshlennost' Rossii*, 2018, no. 12, pp. 68–73. (In Russ.).
- World's best cities: A Ranking of Global Place Equity*. Resonance, 2019.

УДК 911.3

## ВКЛАД А.Е. СЛУКИ В РАЗВИТИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ГЕОГРАФИИ ЗАРУБЕЖНОГО МИРА

© 2023 г. В. А. Колосов<sup>а</sup>, \*, Н. А. Слука<sup>б</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>б</sup>Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: kolosov@igras.ru

\*\*e-mail: sluka2011@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.12.2022 г.

После доработки 03.12.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2023 г.

Авторы анализируют творчество и вклад заслуженного профессора Московского университета А.Е. Слуки в развитие советской и российской школы социально-экономического страноведения зарубежного мира. В научном поиске ученого, опиравшегося на труды своих учителей – корифеев отечественной общественной географии Н.Н. Баранского и И.А. Витвера, прослеживается три ключевых направления – географическое франковедение, демогеографическая европеистика и социальная география Большого Парижа. С позиций сегодняшнего дня значение работ А.Е. Слуки по географии Франции состоит в точности характеристик ее районов как основы для понимания территориальных сдвигов и социальной ситуации, эволюции региональной политики в стране и других европейских странах. А.Е. Слука аргументировал перспективность региональной политики в России (в принятой во Франции терминологии – “устройства территории”). Ученый был ведущим отечественным специалистом по демогеографии и одним из первых обратил внимание на связь динамики населения региона и его основных структур с миграционной компонентой, внес заметный вклад в сравнительное изучение естественного движения и мобильности населения в странах Западной Европы в региональном разрезе. Значительное место в творчестве А.Е. Слуки заняло изучение Большого Парижа. В работах автора периоды расцвета и упадка города увязаны с мировыми событиями, оценкой выполняемых им функций и формированием транснациональных корпораций. Применен полимасштабный подход, позволивший выявить место Парижской агломерации в системах расселения разного уровня, экономике и политической жизни района, страны, Европы. Исследования А.Е. Слуки легли в основу многих учебных курсов, получили развитие в работах его учеников, сотрудников Института экономики города, Института демографии и урбанистики ВШЭ, факультета лингвистики и регионоведения, Института социальных наук МГУ и других учреждений.

*Ключевые слова:* история общественной географии, Россия, страноведение, изучение Франции, демогеография

DOI: 10.31857/S258755662303007X, EDN: QQYWEQ

### ВВЕДЕНИЕ

Труды по истории науки выполняют не только важную функцию летописи науки и передачи знаний о предшественниках – преемственности поколений, что, безусловно, сказывается на престижности науки и образования в целом, но и представляют большой интерес для исследователей. Такие труды, раскрывая “частные сюжеты”, позволяют освежить в памяти, систематизировать, сопоставить и по-новому оценить собственные представления о многих сложных, не всегда очевидных, процессах и явлениях. Это касается как формирования разных школ, центров и направлений географической науки, так и вклада в ее развитие отдельных ученых (Агирречу, Мироненко, 2019; Синцеров и др., 2021). Особую когорту выдающихся тружеников и отчасти незаслуженно за-

бытых ученых составляют послевоенные выпускники МГУ – продолжатели школы Витвера, страноведы зарубежного мира. Кафедра экономической и политической географии капиталистических стран была создана при почвенно-географическом факультете МГУ в 1934 г. Н.Н. Баранским и И.А. Витвером, который возглавлял ее более 20 лет (до 1956 г.) и заслуженно считается основателем советской научной школы социально-экономического страноведения<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> В 1959 г. произошло разделение кафедры на две: кафедру экономической и политической географии капиталистических и развивающихся стран и кафедру экономической географии зарубежных социалистических стран. Заведующим кафедрой экономической и политической географии капиталистических и развивающихся стран стал профессор В.В. Вольский (1921–1999 гг.), который возглавлял ее в течение 40 лет.

В число ближайших учеников, послевоенных аспирантов и соратников И.А. Витвера входит и А.Е. Слука (1923–2007), родившийся в небольшом городке Горки Могилевской области, прошедший Великую Отечественную войну и проделавший путь от студента и аспиранта географического факультета МГУ до крупного специалиста-страноведа и педагога, удостоенного звания “Заслуженный профессор Московского университета”. В 1984 г. он защитил докторскую диссертацию, издав по той же теме монографию “Население Западной Европы: Воспроизводство, миграции, расселение, занятость” (Слука, 1984). А.Е. Слука – автор почти 200 научных и учебно-методических работ по разным темам социально-экономической географии. До самой кончины его основная деятельность была неразрывно связана с кафедрой и географическим факультетом МГУ.

Научные идеи А.Е. Слукки оказали глубокое воздействие на развитие отечественной экономической и социальной географии, страноведения зарубежного мира во второй половине XX – начале XXI вв., в полной мере еще не осмысленное. Цель данной статьи, выходящей в год 100-летия со дня рождения ученого, – анализ его научного наследия и вклада в развитие научной и образовательной школы И.А. Витвера.

#### А.Е. СЛУКА И ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ФРАНКОВЕДЕНИЕ

Большинство питомцев школы И.А. Витвера, согласно негласно сложившемуся “разделению труда” и обеспечению учебного процесса, как правило, “заведовали” одной–двумя странами и одновременно одной–двумя отраслями или сферами хозяйства. Так, О.В. Витковский специализировался на изучении Германии, географии промышленности и политической географии; Л.И. Бонифатьева – стран Азии и географии городов. А.Е. Слука был исследователем Франции и специалистом по географии населения. Ученики И.А. Витвера опирались преимущественно на классическую схему экономико-географической характеристики страны, созданную еще Н.Н. Баранским. Основатель советской экономической географии подчеркивал, что необходимо выделить важнейшие черты, отличающие данную страну или район от всех прочих; поставить эти черты в определенную связь между собой, в определенную систему; выделить ведущие, занимающие в этой системе центральное положение. Затем мобилизуются те знания о положении, природе и исторических судьбах страны или района, которые могут объяснить уже выявленные особенности хозяйственного облика страны или рай-

она: “Того, что есть везде, в географии не должно быть нигде” (Баранский, 1954, с. 153).

“По этой схеме были построены характеристики районов СССР и в учебниках Н.Н. Баранского, и в первом издании Большой Советской энциклопедии (БСЭ), где Н.Н. Баранский возглавлял географическую редакцию” (Алексеев, 2020, с. 59). В соответствии с ней готовились и первые труды по экономико-географическому страноведению зарубежного мира. И.А. Витвером (1930, 1939 и др.) были заложены основы географической латиноамериканистики и европеистики. В 1950–60-х годах вышли крупные монографии И.М. Маергойза (1956 и др.); стартовала серия книг “У карты мира”.

Опираясь на поддержку И.А. Витвера, А.Е. Слука оказался у истоков географического франковедения. Классикой жанра можно считать его первое сольное учебное пособие “Экономическая география Франции” (1956). Материалы этого пособия были существенно дополнены и обогащены И.А. Витвером в совместной с А.Е. Слуккой монографии “Франция. Экономическая география” (1958). Внимание научной общественности также привлек фундаментальный труд А.Е. Слукки “Современная Франция”, созданный в соавторстве с И.А. Витвером и Г.П. Черниковым, но опубликованный в 1969 г., уже после смерти учителя. В этих и последующих работах А.Е. Слукки нашли воплощение все основные принципы витверовской научной школы: историзм, широта и комплексность подхода, объективность и точность изложения выводов; постоянное обращение к теории и практике экономического районирования. В частности, характеристике экономических районов во всех книгах о Франции отводится более трети. “Франция” И.А. Витвера и А.Е. Слукки представляет несомненный интерес и в историко-географическом плане, и с точки зрения качества региональных зарисовок. Эта книга во многом не утратила своего значения и сейчас.

К районной части А.Е. Слукки на протяжении всей профессиональной карьеры обращался многократно, выделяя, по крайней мере, три аспекта. Во-первых, как опоры региональной политики. «Понятие “районы” во Франции весьма значимо, и без знания районной специфики трудно понять происходящие в стране процессы» (Слука, 2006, с. 211). Во-вторых, как базиса для оценки больших межрайонных контрастов в уровне экономического развития и динамике населения, а также территориальных сдвигов. В-третьих, как основы межгосударственных сопоставлений: “...многие районы северной Франции по своим социально-экономическим показателям близки к районам Великобритании и ФРГ, а районы в центре и на юге страны – к средиземноморским странам” (Слука, 1984, с. 5). На материалах изучения систе-

мы планирования и районов Франции А.Е. Слука аргументировал перспективность политики “территориального переустройства” (*aménagement du territoire*) нашей страны для преодоления территориальных диспропорций и достижения “более сбалансированного размещения производства, занятости и доходов населения...” (Кузина, 2015, с. 16), базовые принципы которой оказались отчасти востребованы при разработке комплексных федеральных и региональных программ России, начиная с середины 1990-х годов.

Улавливая смену исторических эпох и тренды развития географии, А.Е. Слука осознавал необходимость “выхода за пределы” изучаемой территории и “утвержденных схем”, что по А.И. Алексееву (2020) составляет секрет исследовательского успеха. Тем более с позиций классического страноведения необъяснимо трудное вхождение Франции в процесс глобализации и наступление после “тридцати славных лет” (1946–1973 гг.), по выражению Р. Буайе, “скорбных” десятилетий (Boyer, 1998). Серьезные последствия непродуманных решений и масштабные структурные сдвиги в национальной экономике в результате деиндустриализации и делокации неконкурентоспособного бизнеса были выявлены им задолго до авторов книги “Франция без заводов” (Artus and Virard, 2011), а в обществе – К. Гиллюи, считающегося апологетом социальной модели “двух Франций”: Франции метрополитенских городов и ареалов и “периферийной Франции” (Guilluy, 2013–2018). В период доминирования в советской “нефизической” географии экономико-центричного подхода А.Е. Слука (1979) одним из первых обосновал значимость и предметное поле социальной географии зарубежного мира.

Обновленные разделы по Франции в учебных изданиях (1985–2005) и работы по географическому франковедению с упором на социально-демографические аспекты создавались А.Е. Слукой (2000–2006) на протяжении последней четверти XX в. и вплоть до начала XXI в. Отчасти благодаря этим усилиям, несмотря на признание острого кризиса отечественного страноведения<sup>2</sup>, “франковедения он коснулся в меньшей степени, чем других отраслей. В условиях кризиса современной глобализации и пандемии коронавируса интерес к национальному опыту возвращается, и можно надеяться, что в новом контексте интерес к отдельным странам восстановится” (Гордон, Лапина, 2021, с. 174).

<sup>2</sup> Упадок отечественного страноведения единодушно отмечается авторами тематического номера “Судьба страноведения в России” журнала “Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право”. 2021. Т. 14. № 6.

## А.Е. СЛУКА И ДЕМОГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ЕВРОПЕИСТИКА

Большинство молодых страноведов-европеистов с подачи учителей Н.Н. Баранского и И.А. Витвера воспринимали свои номинальные или фактические тематические поля и объекты исследования как специфичное целое, но и части более широких систем – общественной географии и “европейского дома”, организационно оформившегося поэтапно в Европейское экономическое сообщество (ЕЭС) и Европейский Союз (ЕС). Однако за редким исключением по ряду объективных и субъективных причин страноведы в те годы не выходили за рамки своего исконного поля деятельности. Одна из ключевых проблем заключалась в дефиците зарубежных теоретических трудов и фактической информации. Тем не менее, с середины 1960-х годов на ниве подготовки кафедральных учебников в сфере интересов ученого вошли страны-соседи Франции – Бельгия, Люксембург и Нидерланды (Экономическая ..., 1966), а также ее бывшие колонии – Марокко и Алжир. В 1970-е годы в ходе участия в коллективных трудах по проблемам капиталистических и развивающихся стран (География..., 1971; Государственное ..., 1975; Международное ..., 1981; Экономико-географическое ..., 1978), тесно связанных с одновременным разворачиванием евроинтеграции, формированием систем государственного регулирования, увеличением масштабов миграции рабочей силы, учащением кризисных явлений, радикальными изменениями в развитии производительных сил, вызванных третьей научно-технологической революцией, окончательно обозначился все больший переход А.Е. Слуки от чистого страноведения к макрорегионалистике, Западной Европе.

А.Е. Слука изначально избрал специализацию по географии населения и сформировался не без влияния трудов, с одной стороны, известного статистика-демографа Б.Ц. Урланиса, а с другой – модной на тот период французской школы “географии человека”, а затем – гуманистической географии. Накопленные знания и опыт в области анализа социально-демографического развития Франции, сопредельных стран и Европы в целом (Слука, 1975) в условиях становления постиндустриального общества позволили ученому выйти на новые исследовательские горизонты. Во-первых, в полемике с Б.С. Хоревым и В.Н. Чапекон о видах движения населения он предложил рассматривать “...шесть главных форм динамики населения – воспроизводство, пространственную, социально-классовую, национальную (этническую), экономическую (трудовую) деятельность, мобильность населения и эволюцию форм его расселения” (Слука, 1984, с. 5). Во-вторых, была определена роль демогеографии как нового

важного направления комплексного исследования населения, формирующегося на стыке демографии и географии. “Ее сущность – исследование территориальных особенностей воспроизводства населения, формирующихся в процессе развития человеческого общества, их причин и последствий, влияния на жизнь общества” (Слука, 1984, с. 8–9). Эта идея получила в дальнейшем развитие в концепции геодемографической обстановки и системы Г.М. Федорова (Федоров, 1984) и ряде иных трудов. Собственно, четкого разделения между демогеографией и геодемографией нет до сих пор, не определено до конца и их место в системе наук. В-третьих, теоретические разработки были реализованы в виде развернутой характеристики демогеографии Западной Европы как целостного региона (Слука, 1984) и пособия по географии населения с основами демографии и этнографии (Слука, 1988).

В-четвертых, А.Е. Слука обратил внимание на связь динамики населения региона и его основных структур с миграционной компонентой, что вкупе с анализом социально-экономических отношений дало общее видение проблемы, а затем стало предметом новой проблемной научной области – миграциологии, развиваемой преимущественно демографами. В отличие от экономистов и демографов, А.Е. Слука пытался отразить выраженность такого взаимодействия в пространстве. В частности, с одной стороны, он оценил тогдашнее место Западной Европы в потоках международной миграции (Слука А., Слука Н., 2000), а с другой – составил и регулярно отслеживал иерархию стран-членов ЕС по степени “разбавленности” населения (термин автора) гражданами других стран, выявил демографическую специфику модели “центр–периферия” в регионе. Минимальная доля официально зарегистрированных иностранных подданных (лишь 1–2%) была в то время характерна для стран, расположенных на периферии региона и, как правило, ранее отличавшихся более значительной эмиграцией, нежели иммиграцией (Слука, 2000).

В-пятых, сопоставление по странам естественного движения и объемов, структуры, направлений перемещения населения привело к выводу о масштабности и центральности проблемы иммиграции в социально-экономическом развитии Западной Европы. Проведенный анализ позволил автору сформулировать комплекс напорную и косвенно связанных с ней реальных и перспективных проблем демогеографического характера. В их число входят феномен “старых наций”, крах традиционных семейных устоев, заметное изменение национального состава, разнообразие форм социальной дифференциации, рост социальной напряженности в обществе и т.д. Большая часть из

них со времени публикации работ А.Е. Слуки лишь обострилась. Эмпирически были доказаны слабая эффективность natalistской политики и отсутствие прямой зависимости между экономическими и демографическими трендами. “В 90-х годах XX в. в Западной Европе сохранялись высокие темпы роста экономики, увеличивался ВВП, годовые темпы инфляции в большинстве государств не превышали 2–3%, уровень жизни населения заметно повысился, однако многие демографические показатели резко ухудшились” (Слука, 2006, с. 164). Ситуация принципиально мало изменилась и в последующие десятилетия<sup>3</sup>. Оценивая сокращение доли Европы в населении мира за 1950–2025 гг. согласно расчетам экспертов ООН, А.Е. Слука указывал: “Обезлюдение” Европы – одна из самых важных и актуальных проблем всего человечества, однако, в первую очередь ее решение зависит от поведения самих европейцев!” (Слука, 2006, с. 175).

Принципы исследований, выявленные закономерности и общий проблемный фон демографической европеистики нашли отражение во многих учебных и научных трудах А.Е. Слуки. Они оказались востребованными при формировании новой структуры МГУ – факультета иностранных языков и регионоведения, становлении бюллетеня “Население и общество” (Центр демографии и экологии человека Института народнохозяйственного прогнозирования РАН). Работы А.Е. Слуки получили развитие в 2000-х годах в публикациях под рубрикой “Демографический барометр” электронного издания “Демоскоп Weekly”.

#### А.Е. СЛУКА И СОЦИАЛЬНАЯ ГЕОГРАФИЯ БОЛЬШОГО ПАРИЖА

В районной части экономико-географической характеристики страны по Н.Н. Баранскому центральное место занимало изучение территориальных контрастов и характер пространственных сдвигов, масштаб которых, как известно, в первую очередь задают большие города. Именно они, по Ж. Боже-Гарнье и Ж. Шабо, “знаменуют усилие и торжество цивилизации” (Боже-Гарнье, Шабо, 1967, с. 190); они же, по Н.Н. Баранскому, представляют собой маяки и опорные точки всей хозяйственной географии страны, фокусы ее культурной и политической жизни (Маергойз, 1965, с. 3). Одновременно Н.Н. Баранский утверждал: “Чтобы ... изучить город, одних источников – текстовых, статистических, картографических – еще недостаточно, совершенно необходимо видеть

<sup>3</sup> См., например: Шербакова Е.М. Основные демографические итоги 2020 года в Европейском союзе // Демоскоп Weekly. 2021. № 909–910. С. 1–30. <http://www.demoscope.ru/weekly/2021/0909/barom01.php> (дата обращения 14.07.2022).

город своими глазами...; присмотреться к городской толпе, побывать в промышленных и торговых предприятиях, учебных заведениях, на общественных развлечениях, отбирая по каждой линии наиболее характерные и для данного города специфические места” (Баранский, 1952, с. 145).

Волею профессиональных судеб в центре внимания А.Е. Слуки оказалась столица Франции. Как отмечал сам ученый, “о Париже и парижанах имеется масса литературы самого разнообразного характера. Но далеко не все стороны жизни этого огромного и очень сложного городского организма исследованы обстоятельно. Время постоянно меняет ситуацию, обновляет реальные границы, функции и облик города, состав жителей, ставит новые экономические и социальные проблемы” (Слука, 1992, с. 99). И.А. Витвер и А.Е. Слука писали о столице Франции так, как они понимали город: “Современный Париж многообразен, как многообразна его история... Париж — один из мировых оплотов капитализма и один из мировых очагов революций; город, в котором замечательные образцы архитектуры и парадные проспекты соседствуют с тесными и темными закоулками перенаселенных трущоб; город, получивший законную славу как сокровищница культурных ценностей, созданный талантом и упорным трудом многих поколений...; город, в котором культурная утонченность и постоянное искание новых путей контрастируют с филистерской ограниченностью сытого рантье” (Витвер и др., 1969, с. 275).

А.Е. Слука в полной мере реализовал заветы Н.Н. Баранского: неоднократно бывал в столице Франции; любил Париж, был готов бесконечно восхищаться и красочно повествовать о городе. И одновременно в течение всей карьеры искал и апробировал, по А.И. Алексееву, алгоритм “выхода за пределы” территории и “утвержденных схем” исследования для отражения наиболее важных черт “динамического портрета” этого великого города. Ему оказалось отведено более полвека (Слука, 1956–2006).

Нашупать и раскрыть многие особенности города ему удалось, предложив синтез подходов, или авторский концепт “осмысления городского пространства”. Это и геоисторический подход, увязывающий периоды расцвета и упадка города во временном ряду в контексте мировых событий. Это и полимасштабный подход: Париж в многоярусной территориальной иерархии — от малого по территории района Франции до глобального города с упором на специфику понятийно-терминологического аппарата, что важно с учетом различия между советскими (российскими) и французскими концепциями интегрированных систем городского расселения (Glezer et al., 2014). Это и экономико-функциональный подход — через оцен-

ку выполняемых функций и процесс транснационализации экономики как первоосновы конкурентоспособности территории, ставшей одной из центральных тем в современной региональной и городской экономике. Это и геополитический подход — через роль столицы во внутренних и внешних конфликтах и их урегулировании. Это и образный подход — через яркую трансляцию собственных впечатлений о достопримечательностях и достоинствах города до восприятия его негативных сторон, что влияет на соотношение когнитивных и аффективных компонентов категории туристской дестинации (Александрова, 2015; Коль, 2015). Это, конечно, и собственно демогеографический подход — учет источников и динамики людности города, его места в системах расселения разных масштабов, меняющихся состава и характера размещения населения.

В число несомненных достижений автора входит мастерски исполненный историко-географический анализ формирования города, включающий причины его превращения в мировой культурный центр и становления планировочной структуры Большого Парижа, в том числе образование новых полюсов, зон и коридоров роста на периферии агломерации, роли столицы Франции в политической жизни страны, Европы и всего мира. Изучая географию населения Парижской агломерации, А.Е. Слука уделял особое внимание как сдвигам в его демосоциальных структурах, которые служат ориентиром для многих крупных городов непростого перехода к постиндустриальному обществу, так и внешней миграции, предвосхищая одну из самых острых и злободневных проблем сегодняшних глобальных городов. Париж испытал много волн иммиграции, вызванной разными факторами и разных по составу мигрантов. Этнический состав его жителей становился все более пестрым. В 1962 г. лица иностранного происхождения составляли 10% населения, а уже в первое десятилетие XXI в. их доля достигла 20%, а в некоторых районах превысила 30%. Одновременно в этот период произошло “осознание неэффективности политики социальной адаптации иммигрантов, активизация в связи с этим ультраправых сил” (Битюкова, 2013). Главный вывод работ А.Е. Слуки звучит сегодня как предостережение: простых и быстрых путей интеграции иностранных мигрантов в общество принимающей страны не бывает, и за плохо контролируемый приток дешевых рабочих рук придется платить высокую цену.

А.Е. Слука подчеркивал и практическую значимость географического изучения Парижской агломерации, проводя многочисленные аналогии между французской столицей и Москвой. Действительно, несмотря на очевидные различия, эти города похожи своей морфологией — истори-

чески сложившейся радиально-кольцевой структурой, конфигурацией Сены и Москвы-реки как важных архитектурно-планировочных осей, и контрастами между привилегированной западной частью и промышленной восточной, ныне во многом стертыми. В обеих странах сложилось весьма противоречивое отношение к своим столицам. Париж и Москва принадлежат, по выражению французского географа П. Клаваля, к числу “тяжелых” столиц, то есть обладают высоко диверсифицированным набором функций, намного превосходят по численности населения другие города страны и возглавляют государства с централизованной системой власти.

Формально Москва далеко опережает Париж по демографическому потенциалу, но именно А.Е. Слуква первым доказал, что на самом деле они вполне сопоставимы, если рассматривать французскую столицу не в границах *intra muros*, но включать в нее и прилегающие департаменты. Под руководством профессора французским аспирантом была защищена диссертация, посвященная сравнению двух столиц (Talachian, 1993). Такой подход укоренился в отечественной литературе: бывший главный архитектор Москвы А.В. Кузьмин и известный специалист-москвовед Л.Я. Ткаченко предлагают сравнивать Москву в новых границах с регионом Иль-де-Франс; они пишут о том, что сравнение двух столиц стало “хрестоматийным” (Кузьмин, Ткаченко, 2020). Административные границы российской столицы неоднократно расширялись по мере роста города, тогда как ситуация в Парижской агломерации хотя и менялась, но оставалась гораздо сложнее, особенно из-за пересечения компетенций многочисленных властей разного уровня.

Идеи А.Е. Слуквы получили значительное развитие в пору работы нескольких авторских коллективов, разрабатывавших проекты развития Большой Москвы в рамках международного конкурса, объявленного правительством столицы. Общность многих проблем Москвы и Парижа и подходов, используемых градостроителями двух столиц, способствовала победе российско-французской группы под руководством А. Грюмбаха (Бюржель и др., 2020).

Похожи и многие проблемы двух столиц: наплыв мигрантов, улучшение экологической обстановки, необходимость обновления и расширения жилого фонда, транспортная доступность, обеспечение комфортной для жителей и безопасной городской среды и т.п. В условиях усилившейся международной конкуренции за человеческий капитал, инвестиции и привлечение передовых функций власти Парижа и Москвы реализуют, хотя и с разным успехом, беспрецедентные по размаху программы модернизации, которые даже называют по-

хоже – Большой Париж и Большая Москва. Эти программы включают создание многополярной структуры агломерации и рост инновационных кластеров разной специализации, цифровизацию всех сфер деятельности, обеспечение приоритетного развития общественного транспорта, каршеринга и аренды индивидуальных средств передвижения (велосипедов, скутеров и т.п.), снижение нагрузки на природную среду и выброса парниковых газов. Некоторые проблемы, например, миграционная, возникли в Париже гораздо раньше, чем в Москве, которая извлекает уроки из французского опыта, успешно предотвращая появление этнических гетто, подобных некоторым парижским пригородам. В свою очередь, и в Париже теперь провозглашена политика социального разнообразия. В ее рамках, например, один из семи инновативных кластеров, специализирующийся на творческой деятельности (кино, цирковое искусство), социальных и гуманитарных науках размещен в неблагополучном пригороде Сен-Дени, известном высокой долей выходцев из Африки. В некоторых сферах Москва опережает Париж (например, в развитии онлайн-сервисов) (Воделэн, 2018; Vaudelin, 2018). Созданный теоретико-методологический фундамент изучения социальной географии Парижа находит уверенное продолжение в трудах молодых исследователей из разных организаций: Московского университета имени М.В. Ломоносова, ИНИОН РАН, МГИМО, Института Европы и др. [например, (Шатило, 2021)].

## РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ И ПЕРЕДАЧА ЗНАНИЙ

Научное творчество в образовательном учреждении, особенно в Московском университете, неотделимо от педагогической деятельности и подготовки высококвалифицированных кадров. Наряду с созданием монографий и статей для научных сборников, отдельный и весьма весомый пласт вузовской работы составляет чтение курсов лекций, разработка учебно-методической литературы, организация практик, руководство курсовыми и выпускными работами студентов. Вероятно, педагогическая работа занимала главное место в жизни А.Е. Слуквы, выполнявшего на протяжении нескольких десятилетий обязанности заместителя заведующего кафедрой по учебной работе. Возглавляя долгое время комиссию по подготовке программ курсов и учебников секции экономической географии Учебно-методического объединения (УМО) университетов России по географическим специальностям, он являлся соавтором и членом редколлегии практически всех кафедральных учебников, включая такой известный, как “Социально-экономическая география

зарубежных стран” (переиздания 1998–2005 гг.). Им созданы и на протяжении многих лет читались в Московском университете оригинальные курсы лекций “География населения мира (с основами демографии и этнографии)”, “Экономическая и политическая география Европы”, “Социально-экономическая география Франции”, “Социально-экономическая география Италии”. С учетом специфики учебно-научной специализации, глубины знаний и профессиональности работы с романскими языками среди коллег А.Е. Слук был признан как “подлинный знаток самых изящных и деликатных мест Земли – Франции и Италии”<sup>4</sup>. Он выступал с отдельными лекциями во многих университетах СССР, а также в ряде государств Западной Европы (Франция, Италия), на Кубе и в Сирии. Под его руководством защищены десятки выпускных работ студентов и 17 кандидатских диссертаций, в том числе аспирантами из зарубежных стран – Ирака, Ливана, Франции. В число воспитанников А.Е. Слук входят Д.В. Визгалов – урбанист, известный специалист в области маркетинга и брендинга территорий и один из авторов статьи. Любопытно, что оба защищали кандидатскую диссертацию под руководством А.Е. Слук по политической географии (соответственно, Великобритании и Италии).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

А.Е. Слук, исходя из установок И.А. Витвера и сложившейся практики на кафедре, считал, как и его коллеги-страноведы, первоочередной задачей изучение зарубежного опыта на благо родины. Научное наследие А.Е. Слук внушительно и многогранно. Оставаясь долгое время уникальным специалистом по географическому франковедению, ему удалось не только в полной мере реализовать классическую схему экономико-географической характеристики Франции, но и, пожалуй, единственному из послевоенной когорты учеников школы И.А. Витвера выйти за “ее пределы”. Полученные ученым результаты сыграли большую роль в формировании отечественной школы социально-экономической географии во второй половине XX в. и таких крупных ее разделах, как география населения и зарубежное страноведение. По сути, он предложил и реализовал полимасштабный подход исследования демографического раздела в страноведении. На стыке географии населения и демографии создал целостное представление о Франции по общей оси: районы–Большой Париж–страна–ближайшее

окружение (страны-соседи: Италия, Бельгия, Нидерланды и др.)–Западная Европа и мир. Не меньший интерес в контексте развития и оценки эффектов глобализационных процессов представляют выполненный ученым компаративный анализ социально-демографического развития Западной Европы для регионоведения зарубежного мира. С позиций синтеза концепций “плавильного котла” и “салатницы” или мультикультурализма уникален опыт изучения Большого Парижа, что особо ценно для реализации “комплексного подхода” в культурной географии и географии городов, а также развития концепций социального и символического капитала.

Научные идеи А.Е. Слук востребованы в современных работах по социально-экономической географии, страноведению, регионалистике, географии населения, геоурбанистике, географии туризма и широкому кругу проблем современного мира. Ряд из них получил развитие в посвященной ему книге “Геодемографические феномены глобальных городов” (Слук, 2009) и трудах молодых специалистов. Галерея ярких портретов районов Франции и особенно ее столицы служат платформой адаптации соответствующей информации на сайтах многих туристских фирм, специализирующихся на европейском направлении и развития брендинга территорий в России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агирречу А.А., Мироненко К.В.* Экономико-географическое изучение Китая в отечественной географической литературе // Изв. РГО. 2019. № 3. С. 73–93.
- Александрова А.Ю.* Рейтинги глобальных городов мира как туристских дестинаций и место в них Москвы // Региональные исследования. 2015. № 3 (49). С. 122–130.
- Алексеев А.И.* Экономико-географическая характеристика по Баранскому: Какой она может быть сегодня? // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2020. № 1. С. 57–62.
- Баранский Н.Н.* Экономическая география СССР: Учеб. для 8 класса средней школы. М.: Учпедгиз, 1952. 415 с.
- Баранский Н.Н.* Очерки по школьной методике экономической географии. М.: Учпедгиз, 1954. 320 с.
- Битюкова Д.П.* Расселение иммигрантов как фактор социальной стратификации европейских столиц // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 2. С. 31–37.
- Божье-Гарнье Ж., Шабо Ж.* Очерки по географии городов. М.: Прогресс, 1967. 424 с.
- Бюржель Г., Бюржель Г., Грондео А., Дарк Р., Колосов В.А., Шупер В.А., Эм П.П., Ферару А., Ширрер М.* Сорок лет

<sup>4</sup> Рогачев С.В. Александр Евгеньевич Слук // География. 2007. № 17. <https://geo.isept.ru/article.php?ID=200701707> (дата обращения 24.10.2022).

- франко-российских сравнительных исследований по географии городов: переосмысление опыта // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 3. С. 470–480. <https://doi.org/10.31857/S2587556620030048>
- Витвер И.А.* Бразилия и Аргентина: Социографический очерк. М.—Л.: Красный пролетарий, 1930. 159 с.
- Витвер И.А.* Экономическая география Германии. М.: Моск. ун-т, 1939. 112 с.
- Витвер И.А., Слука А.Е.* Франция. Экономическая география. М.: Географгиз, 1958. 415 с.
- Витвер И.А., Слука А.Е., Черников Г.П.* Современная Франция. М.: Мысль, 1969. 430 с.
- Воделэн Х.* Большой Париж и Большая Москва: планы модернизации и инновации // Южно-российский журн. соц. наук. 2018. Т. 9. № 2. С. 38–49.
- Вольский В.В., Бонифатьева Л.И. И.А. Витвер — жизнь и творчество // Вопросы экономич. и политич. географии зарубежных стран. М.: ИЛА РАН, 1990. Т. 11. С. 7–25.*
- География трудовых ресурсов капиталистических и развивающихся стран / под ред. В.В. Вольского, Ю.А. Колосовой. М.: Мысль, 1971. 469 с.
- Гордон А.В., Лапина Н.Ю.* Изучение Франции в постсоветской России // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2021. № 6. С. 163–183. <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2021-14-6-8>
- Государственное регулирование размещения производительных сил в капиталистических и развивающихся странах / под ред. В.В. Вольского, Ю.А. Колосовой. М.: Мысль, 1975. 424 с.
- Коль О.Д.* Особенности крупного города как туристской дестинации: системный подход // “Концепт”. 2015. Т. 33. С. 76–80.
- Кузина И.М.* Александр Евгеньевич Слука: страновед и геодемограф, педагог и ученый // Вопросы экономич. и политич. географии зарубежных стран. М.— Смоленск: Ойкумена, 2015. Т. 20. С. 9–22.
- Кузьмин А.В., Ткаченко Л.Я.* Москва—Париж: параллели и перпендикуляры территориального планирования // Архитектура и градостроительство. 2020. № 1. С. 85–96. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-1-85-96>
- Маергойз И.М.* Чехословацкая Социалистическая Республика: Экономическая география. М.: Мысль, 1964. 732 с.
- Маергойз И.М.* Н.Н. Баранский и советская география городов // Вопросы географии. Сб. 66. М.: Мысль, 1965. С. 3–5.
- Международное географическое разделение труда в капиталистическом мире / под ред. В.В. Вольского, Ю.А. Колосовой. М.: Моск. ун-т, 1981. 264 с.
- Синцеров Л.М., Стрелецкий В.Н., Трейвиш А.И.* Ю.Г. Липец и отечественная социально-экономическая география // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. № 4. С. 607–615. <https://doi.org/10.31857/S2587556621040105>
- Слука А.Е.* Экономическая география Франции. М.: Моск. ун-т, 1956. 126 с.
- Слука А.Е.* Динамика населения в странах Западной Европы // Вопросы экономич. и политич. географии зарубежных стран. М.: ИЛА АН СССР; Моск. ун-т, 1975. Т. 2. С. 188–210.
- Слука А.Е.* Проблемы изучения социальной географии Франции // Итоги науки и техники. География зарубежных стран / под ред. О.В. Витковского, К.С. Лейкиной. М.: ВИНТИ, 1979. Вып. 6. С. 9–49.
- Слука А.Е.* Население Западной Европы: Воспроизводство, миграции, расселение, занятость. М.: Финансы и статистика, 1984. 271 с.
- Слука А.Е.* География населения с основами демографии и этнографии. М.: Моск. ун-т, 1988. 96 с.
- Слука А.Е.* Население Большого Парижа (социальные структуры и их динамика) // Вопросы экономич. и политич. географии зарубежных стран. М.: ИЛА РАН, 1992. Т. 12. С. 99–111.
- Слука А.Е.* Демографические проблемы Западной Европы // Современная Европа. 2000. № 4. С. 93–99.
- Слука А.Е.* Демографический кризис в странах Европы: причины и последствия // Вопросы экономич. и политич. географии зарубежных стран. М.: Моск. ун-т, 2006. Т. 16. С. 164–176.
- Слука А.Е.* Районы Франции: показатели развития // Вопросы экономической и политической географии зарубежных стран. Вып. 16. М.: Моск. ун-т, 2006. С. 211–116.
- Слука А.Е., Слука Н.А.* География населения с основами демографии. М.: МГУ, 2000. 140 с.
- Слука Н.А.* Геодемографические феномены глобальных городов. Смоленск: Ойкумена, 2009. 317 с.
- Социально-экономическая география зарубежного мира. М.: Дрофа, 1998–2005.
- Талачан М.* Сравнение некоторых аспектов развития агломераций Москвы и Парижа. М.: Моск. ун-т, 1993. 184 с.
- Федоров Г.М.* Геодемографическая обстановка: Теоретические и методические основы / под ред. Н.Т. Агафонова. Л.: Наука, 1984. 112 с.
- Шатило Д.П.* Пространственная этносоциальная структура населения Лондона, Парижа, Мадрида, Берлина и Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 2. С. 54–66.
- Экономико-географическое прогнозирование в капиталистических и развивающихся странах / отв. ред. В.В. Вольский, Ю.А. Колосова. М.: Мысль, 1978. 391 с.
- Экономическая география капиталистических стран Европы / под ред. И.М. Маергойза. М.: Моск. ун-т, 1966. 392 с.
- Artus P., Virard M.-P.* La France sans ses usines. P.: Fayard, 2011. 184 p.

- Boyer R. Heures et malheurs de l'industrie française: 1945–1995. Essor et crise d'une variante étatique du modèle fordiste. P.: CEPREMAP, 1998. 39 p.
- Glezer O.B., Kolosov V.A., Brade I., Coudroy de Lille L., Sluka N.A. Integrated forms of urban settlement pattern in Russia, Europe, and worldwide // Reg. Res. Rus. 2014. Vol. 4. № 2. P. 80–89.
- Guilluy Ch. Fractures françaises. Paris: Flammarion, 2013. 206 p.
- Guilluy Ch. La France périphérique: Comment on a sacrifié les classes populaires. Paris: Flammarion, 2014. 185 p.
- Guilluy Ch. Le crépuscule de la France d'en haut. Paris: Flammarion, 2016. 272 p.
- Guilluy Ch. No Society. La fin de la classe moyenne occidentale. Paris: Flammarion, 2018. 240 p.
- Vaudelin C. The Grand Paris and the New Moscow: Compared Perspectives // RUDN J. of Political Sci. 2018. Vol. 20. № 2. P. 246–254.

## The Contribution of A.E. Sluka to the Development of Russian Human Geography of the Foreign World

V. A. Kolosov<sup>1, \*</sup> and N. A. Sluka<sup>2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Faculty of Geography, Moscow State University, Moscow, Russia*

\*e-mail: kolosov@igras.ru

\*\*e-mail: sluka2011@yandex.ru

The authors analyze the contribution of the Honored Professor of Moscow State University A.E. Sluka to the development of the Soviet and Russian school of socioeconomic regional studies of the foreign world. It is possible to distinguish three key areas in the studies of the scholar, who relied on the works of his teachers—the founders of contemporary national human geography N.N. Baranskii and I.A. Vitver: geography of France, demogeography of Europe, and geography of the Greater Paris. From today's standpoint, the significance of A.E. Sluka publications on France consist in the accuracy of the characteristics of its regions as a basis for understanding the territorial shifts and the social situation, and the evolution of regional politics in the country and other European countries. A.E. Sluka believed that the experience of regional policy in France (in French terms, *aménagement du territoire*) is important for Russia. The scientist was a leading Russian specialist in demogeography and one of the first to draw attention to the relation between the population dynamics of the region and its main structures with the migration component. He made a considerable contribution to the comparative study of the natural movement and mobility of the population in the countries of Western Europe by regions. A significant place in the work of A.E. Sluka belonged to the Greater Paris. In the author's works, the periods of prosperity and decline of the city are linked with world events, its functions, and the emergence of global economy. A multiscale approach was applied, which made it possible to identify the place of the Paris urban agglomeration in the settlement systems of different levels, the economy and political life of the region, the country and Europe as a whole. The studies of A.E. Sluka created a basis for many academic courses and was developed in the works of his students and the scholars of the Institute of Urban Economics, the Institute of Demography and the Institute of Urban Studies of the HSE University, the Faculty of Linguistics and Regional Studies and the Institute of Social Sciences of Moscow State University and other institutions.

*Keywords:* history of human geography, Russia, A.E. Sluka, regional studies, French studies, demogeography

### REFERENCES

- Aleksandrova A.Yu. Ranking of world global cities as tourist destinations and Moscow particular position. *Reg. Issled.*, 2015, no. 3 (49), pp. 122–130. (In Russ.).
- Alekseev A.I. Economic-geographical Description according to Baranskii: What could it be like at present? *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2020, no. 1, pp. 57–62. (In Russ.).
- Artus P., Virard M.-P. La France sans ses usines. P.: Fayard, 2011. 184 p.
- Baranskii N.N. *Ekonomicheskaya geografiya SSSR. Uchebnik dlya 8 klassa srednei shkoly* [Economic Geography of the USSR. Textbook for the 8th Grade of Secondary School]. Moscow: Uchpedgiz Publ., 1952. 415 p.
- Baranskii N.N. *Ocherki po shkol'noi metodike ekonomicheskoi geografii* [Essays on the School Methodology of Economic Geography]. Moscow: Uchpedgiz Publ., 1954. 320 p.
- Bitukova D.P. Resettlement of Immigrants as Factor of Social Stratification in the European Capital Cities. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2013, no. 2, pp. 31–37. (In Russ.).
- Beaujeu-Garnier J. et Chabot G. *Traité de géographie urbaine*. Paris, 1964.
- Boyer R. Heures et malheurs de l'industrie française: 1945–1995. Essor et crise d'une variante étatique du modèle fordiste. P.: CEPREMAP, 1998. 39 p.
- Burgel G., Burgel G., Grondeau A., Darques R., Kolosov V.A., Shuper V.A., Em P.P., Feraru A., Schirrer M. Forty Years of French-Russian Comparative Studies in Ur-

- ban Geography: Rethinking of the Experience. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, no. 3, pp. 470–480. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S2587556620030048>
- Ekonomicheskaya geografiya kapitalisticheskikh stran Evropy* [Economic Geography of the Capitalist Countries of Europe]. Maergoiz I.M., Ed. Moscow: Mosk. Univ. Publ., 1966. 392 p.
- Ekonomiko-geograficheskoe prognozirovaniye v kapitalisticheskikh i razvivayushchikhsya stranakh* [Economic and Geographical Forecasting in Capitalist and Developing Countries]. Volskii V.V., Kolosova Ju.A., Eds. Moscow: Mysl' Publ., 1978. 391 p.
- Fedorov G.M. *Geodemograficheskaya obstanovka: Teoreticheskie i metodicheskie osnovy* [Geodemographic Situation: Theoretical and Methodological Foundations]. Agafonov N.T., Ed. Leningrad: Nauka Publ., 1984. 112 p.
- Geografiya trudovykh resursov kapitalisticheskikh i razvivayushchikhsya stran* [Geography of Labor Resources of Capitalist and Developing Countries]. Volskii V.V. and Kolosova Yu.A., Eds. Moscow: Mysl' Publ., 1971. 469 p.
- Glezer O.B., Kolosov V.A., Brade I., Coudroy de Lille L., Sluka N.A. Integrated forms of urban settlement pattern in Russia, Europe, and worldwide. *Reg. Res. Rus.*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 80–89.
- Gordon A.V., Lapina N.Yu. Exploring France in Post-Soviet Russia. *Kontury Glob. Transform.: Politika, Ekonomika, Pravo*, 2021, no. 6, pp. 163–183. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.23932/2542-0240-2021-14-6-8>
- Gosudarstvennoe regulirovaniye razmeshcheniya proizvoditel'nykh sil v kapitalisticheskikh i razvivayushchikhsya stranakh* [State Regulation of the Allocation of Productive Forces in Capitalist and Developing Countries]. Volskii V.V., Kolosova Ju.A., Eds. Moscow: Mysl' Publ., 1975. 424 p.
- Guilluy Ch. *Fractures françaises*. Paris: Flammarion, 2013. 206 p.
- Guilluy Ch. *La France périphérique: Comment on a sacrifié les classes populaires*. Paris: Flammarion, 2014. 185 p.
- Guilluy Ch. *Le crépuscule de la France d'en haut*. Paris: Flammarion, 2016. 272 p.
- Guilluy Ch. *No Society. La fin de la classe moyenne occidentale*. Paris: Flammarion, 2018. 240 p.
- Kol' O.D. Features of a large city as a tourist destination: a systematic approach. *"Concept"*, 2015, vol. 33, pp. 76–80. (In Russ.).
- Kuzina I.M. Aleksandr Evgen'evich Sluka. Regional Expert and Geodemographer, Teacher and Scientist. In *Voprosy ekonomicheskoi i politicheskoi geografii zarubezhnykh stran* [Issues of Economic and Political Geography of Foreign Countries]. Smolensk: Ojkumena Publ., 2015, vol. 20, pp. 9–22 (In Russ.).
- Kuzmin A.V., Tkachenko L.Ya. Moscow–Paris: Parallels and Perpendiculars of Spatial Planning. *Architectura i Gradostroitel'stvo*, 2020, no. 1, pp. 85–96. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-1-85-96>
- Maergoiz I.M. N.N. Baranskii and the Soviet Geography of Cities. In *Voprosy geografii* [Problems of Geography], vol. 66. Moscow: Mysl' Publ., 1965, pp. 3–5. (In Russ.).
- Maergoiz I.M. *Ekonomicheskaya geografiya Vengrii* [Economic Geography of Hungary]. Moscow: MGU Publ., 1956. 320 p.
- Mezhdunarodnoye geograficheskoe razdeleniye truda v kapitalisticheskoy mire* [International Geographical Division of Labor in the Capitalist World]. Volskii V.V., Kolosova Ju.A., Eds. Moscow: MGU Publ., 1981. 264 p.
- Shatilo D.P. Etno-social Spatial Structure of the Population in London, Paris, Madrid, Berlin and Moscow. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. Geogr.*, 2021, no. 2, pp. 54–66. (In Russ.).
- Sintserov L.M., Streletsky V.N., Treivish A.I. Yu.G. Lipets and Soviet and Russian Human Geography. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2021, no. 4, pp. 607–615. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.31857/S2587556621040105>
- Sluka A.E. *Ekonomicheskaya geografiya Frantsii* [Economic Geography of France]. Moscow: Mosk. Univ. Publ., 1956. 126 p.
- Sluka A.E. Population Dynamics in Western European Countries. In *Voprosy ekonomicheskoi i politicheskoi geografii zarubezhnykh stran* [Issues of Economic and Political Geography of Foreign Countries], vol. 2. Moscow: ILA Akad. Nauk SSSR, Mosk. Univ. Publ., 1975, pp. 188–210. (In Russ.).
- Sluka A.E. Problems of Studying the Social Geography of France. In *Itogi nauki i tekhniki. Geografiya zarubezhnykh stran* [Results of Science and Technology. Geography of Foreign Countries], vol. 6. Vitkovskii O.V., Leikina K.S., Eds. Moscow: VINITI Publ., 1979, pp. 9–49. (In Russ.).
- Sluka A.E. *Naseleniye Zapadnoi Evropy: Vosproizvodstvo, migratsii, rasseleniye, zanyatost'* [Population of Western Europe: Reproduction, Migration, Resettlement, Employment]. Moscow: Finansy i statistika Publ., 1984. 271 p.
- Sluka A.E. *Geografiya naseleniya s osnovami demografii i etnografii* [Population Geography with the Basics of Demography and Ethnography]. Moscow: Mosk. Univ. Publ., 1988. 96 p.
- Sluka A.E. The Population of Greater Paris (Social Structures and their Dynamics). In *Voprosy ekonomicheskoi i politicheskoi geografii zarubezhnykh stran* [Issues of Economic and Political Geography of Foreign Countries], vol. 12. Moscow: ILA Akad. Nauk Publ., 1992, pp. 99–111. (In Russ.).
- Sluka A.E. Demographic Problems of Western Europe. *Contemporary Europe*, 2000, no. 4, pp. 93–99. (In Russ.).
- Sluka A.E. Demographic Crisis in Europe: Causes and Consequences. In *Voprosy ekonomicheskoi i politicheskoi geografii zarubezhnykh stran* [Issues of Economic and Political Geography of Foreign Countries]. Moscow: Mosk. Univ. Publ., 2006, vol. 16, pp. 164–176. (In Russ.).
- Sluka A.E. Districts of France: Indicators of Development. In *Voprosy ekonomicheskoi i politicheskoi geografii zarubezhnykh stran* [Issues of Economic and Political Geography of Foreign Countries]. Moscow: Mosk. Univ. Publ., 2006, vol. 16, pp. 211–116. (In Russ.).
- Sluka A.E., Sluka N.A. *Geografiya naseleniya s osnovami demografii* [Population Geography with the Basics of Demography]. Moscow: MGU Publ., 2000. 140 p.
- Sluka N.A. *Geodemograficheskie fenomeny global'nykh gorodov* [Geodemographic Phenomena of Global Cities]. Smolensk: Ojkumena Publ., 2009. 317 p.
- Sotsial'no-ekonomicheskaya geografiya zarubezhnogo mira* [Socioeconomic Geography of the Foreign World]. Moscow: Drofa Publ., 1998–2005. (In Russ.).

- Talachian M. Etude comparative de quelques aspects du développement des agglomérations Parisienne et Moscouite. Moscou: MGU, 1993. 184 p.
- Vaudelin C. Great Paris and Great Moscow: Modernization Plans and Innovation. *Yuzhno-Ross. Zh. Soc. Nauk*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 38–49. (In Russ.).
- Vaudelin C. The Grand Paris and the New Moscow: Compared Perspectives. *RUDN J. Polit. Sci.*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 246–254. (In Russ.).
- Vitver I.A. *Braziliya i Argentina: Sotsiograficheskii ocherk* [Brazil and Argentina: A Sociographic Essay]. Moscow; Leningrad: Krasnyi proletarii Publ., 1930. 159 p.
- Vitver I.A. *Ekonomicheskaya geografiya Germanii* [Economic Geography of Germany]. Moscow: Mosk. Univ. Publ., 1939. 112 p.
- Vitver I.A., Sluka A.E. *Frantsiya. Ekonomicheskaya geografiya* [France. Economic Geography]. Moscow: Geografgiz Publ., 1958. 415 p.
- Vitver I.A., Sluka A.E., Chernikov G.P. *Sovremennaya Frantsiya* [Modern France]. Moscow: Mysl' Publ., 1969. 430 p.
- Volskii V.V., Bonifatieva L.M. I.A. Vitver – Life and Oeuvre. In *Voprosy ekonomicheskoi i politicheskoi geografii zarubezhnykh stran* [Issues of Economic and Political Geography of Foreign Countries]. Moscow: ILA RAN Publ., 1990, vol. 11, pp. 7–25. (In Russ.).