

ОБ АДАПТАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА

В.В. Цыганов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: v188958@akado.ru

С.А. Савушкин

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН
Россия, 199178, Санкт-Петербург, 12 линия В.О., д. 13
E-mail: ssavushkin@mail.ru

Ключевые слова: железнодорожная инфраструктура, стратегическое управление, изменение климата, адаптация, моделирование.

Аннотация: Изменения климата приводят к новым проблемам стратегического управления железнодорожной инфраструктурой. Проактивный подход к решению этих проблем предполагает выделение инвестиций на её адаптацию к этим изменениям. Построены модель и алгоритм прогнозирования и планирования таких инвестиций в условиях неполноты статистических данных. Предложены модификации этой модели и алгоритма, учитывающие сезонные прогнозы различных опасных гидрометеорологических явлений в регионах России. Разработанные модели и алгоритмы использованы при управлении погодно-климатическими рисками транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» в условиях меняющегося климата на период до 2050 года.

1. Введение

К основным проблемам пространственного развития Российской Федерации (РФ) относится негативное влияние изменения климата (ИК) [1]. Изменения температуры и влажности при ИК ухудшают состояние и функционирование транспортной инфраструктуры (ТИ) РФ [2]. На негативное влияние ИК в процессе освоения территории РФ на основе транспортных пространственно-логистических коридоров указано в [3]. Негативные последствия ИК для международных транспортных сетей и необходимость их адаптации к ИК обоснованы в [4]. Вышесказанное определяет актуальность исследований и разработок научно обоснованных подходов к решению проблем стратегического управления ТИ в условиях ИК.

Теоретико-прикладной и методологической базой такого рода исследований и разработок является теория больших транспортных систем (БТС) [5]. В частности, на её основе разработан комплекс моделей управления стратегическим развитием ТИ Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики при ИК [6].

Другое направление теории БТС связано с исследованием влияния ИК на железнодорожную инфраструктуру (ЖИ) [7]. Рассмотрены климатические причины аварий на ЖИ [8]. Собрана и проанализирована статистика происшествий на ЖИ, вызванных гидрометеорологическими воздействиями (далее кратко – происшествий), а

также сопутствующих ущербов ЖИ и расходов на их ликвидацию [9]. Разработаны методы оценки стоимости адаптации ЖИ к ИК [10].

На практике, для решения проблем стратегического управления ЖИ в условиях ИК требуется объединение усилий государственных органов и других заинтересованных сторон. Указанные стороны могут выбрать пассивный или активный подход к решению этих проблем.

Пассивный подход предполагает решение идти на риск, не проводя мероприятий по адаптации ЖИ к ИК (далее кратко – адаптации). Пассивный подход имеет свои плюсы. Во-первых, проекты адаптации связаны с инвестициями в будущее, тогда как проекты развития ЖИ, приносящие быстрые выгоды, сразу же признаются потребителями услуг ЖИ – бизнесом и населением. Во-вторых, сложно отдать предпочтение мерам адаптации, если нужно решать другие задачи развития ЖИ. В таких случаях, выбор менее обременительных в финансовом отношении проектов сулит непосредственные выгоды [4].

Однако пассивный подход опасен неизбежными сбоями в работе и повреждениями ЖИ, которые отразятся на экономике и социальной сфере. Прямой ущерб может выражаться в причинении вреда здоровью и даже гибели людей, а также повреждении ЖИ. Косвенный ущерб проявляется в негативных последствиях для экономики и социальной сферы, вызванных нарушением работы ЖИ. Масштабы последствий будут зависеть от времени, затраченного на восстановительные работы. Ускоренное же восстановление ЖИ приведет к росту расходов заинтересованных сторон.

Проактивный подход к решению проблем стратегического управления ЖИ при ИК предполагает выделение средств на разработку и реализацию соответствующих планов, стратегий и мер адаптации. Данная работа посвящена построению статистических моделей и алгоритмов планирования затрат на адаптацию ЖИ к ИК.

2. Модель и алгоритм планирования затрат на адаптацию

Рассмотрим модель и алгоритм прогнозирования и планирования затрат на адаптацию ЖИ РФ к ИК (кратко – затрат), основанные на статистических данных:

- об опасных гидрометеорологических явлениях на территории РФ, нанесших значительный ущерб экономике и населению РФ (кратко – явлениях);
- о происшествиях на ЖИ РФ, вызванных последствиями указанных явлений (кратко – происшествиях);
- об ущербах ЖИ РФ, вызванных указанными происшествиями.

Обозначим через t номер года, x_t – число явлений в году t , y_t – число происшествий в году t , $t = 1996, 1997, \dots$. На массиве данных [11], используя метод наименьших квадратов, можно определить линейное уравнение для оценки среднего числа m_t явлений в году t (кратко – тренд явлений):

$$(1) \quad m_t = 14,33(t - 1996) + 163,73, t = 1996, 1997, \dots, 2016.$$

Аналогичным образом, на доступных статистических данных, собранных в [9], можно построить линейное уравнение для оценки среднего числа n_t происшествий в году t (кратко – тренд происшествий):

$$(2) \quad n_t = 0,57(t - 2013) + 2,71, t = 2013, \dots, 2018.$$

К сожалению, однако, из-за неполноты статистических данных, использовать уравнение (2) для решения задачи прогнозирования среднего ежегодного числа происшествий путем экстраполяции не представляется возможным.

С другой стороны, решение указанной задачи, при неполных статистических данных о числе происшествий, может быть основано на следующих соображениях. Происшествия на ЖИ РФ, вызванные гидрометеорологическими воздействиями,

являются следствиями опасных гидрометеорологических явлений, нанесших значительный ущерб экономике и населению РФ. Поэтому числа происшествий на ЖИ в году t должны коррелировать с числами указанных явлений в году t .

Далее, имеются статистические данные о числах этих явлений в 1996 – 2016 гг. [11], позволяющие построить тренд (1). Экстраполируя этот тренд, можно получить прогноз m_t числа указанных явлений в году t , $t = 2024, 2025, \dots 2050$. А затем, основываясь на корреляции числа происшествий на ЖИ, вызванных гидрометеорологическими воздействиями, с числом опасных гидрометеорологических явлений, можно получить прогноз n_t числа указанных происшествий в году t , $t = 2024, 2025, \dots 2050$.

Вышесказанное может служить обоснованием для использования на практике следующей процедуры прогнозирования среднего числа происшествий.

- 1) Определяется период совпадений наблюдений явлений и происшествий (кратко - период совпадения), за который имеются статистические данные как о числах явлений [11], так и о числах происшествий [9]: с 2012 по 2016 гг.
- 2) На основе данных [11] рассчитывается среднее за период совпадений число явлений: $m = 416,8$.
- 3) На массиве данных [9], рассчитывается среднее за период совпадений число происшествий: $n = 5,2$.
- 4) Рассчитывается отношение k среднегодового числа происшествий к среднегодовому числу явлений (коэффициент пропорциональности) за период с совпадений: $k = 5,2/416,8 = 0,012$.
- 5) Прогнозное число n_t происшествий в году t принимается пропорциональным прогнозному числу m_t явлений в году t , с коэффициентом k : $n_t = km_t$.
- 6) Прогноз числа n_t происшествий в году t определяется на основе экстраполяции тренда явлений (1) с коэффициентом пропорциональности k :
 - (3) $n_t = km_t = 0,18(t - 1996) + 2,04, t = 2024, 2025, \dots 2050$.
- 7) Определяется средний ущерб e от одного происшествия (кратко - удельный ущерб) на массиве данных [10]: $e = 11,92$ млн руб.
- 8) Прогнозный ущерб d_t в году t рассчитывается как произведение удельного ущерба e на прогнозное число происшествий n_t , так что из (3) следует:
 - (4) $d_t = en_t = 2,13(t - 1996) + 24,32, t = 2024, 2025, \dots 2050$.
- 9) Согласно оценкам Министерства РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий [10], затраты на предупреждение чрезвычайных ситуаций (ЧС) соотносятся с размером ущерба от ЧС, как 1:10. В таком случае, прогнозные затраты p_t в году t рассчитываются как $p_t = 0,1y_t$, так что из (4) следует:
 - (5) $p_t = 0,1y_t = 0,21(t - 1996) + 2,43, t = 2024, 2025, \dots 2050$.
- 10) Плановые затраты (инвестиции) i_t на адаптацию в году t принимаются равными прогнозным затратам p_t : $i_t = p_t$.

На рис. 1а показаны графики: фактического числа явлений x_t в году t ; линейного уравнения для оценки и прогнозирования чисел m_t явлений в году t (тренда явлений); фактического число происшествий y_t ; линейного уравнения для прогнозирования чисел n_t происшествий в году t (тренда происшествий). На рис. 1б показаны графики прогнозов ущерба y_t и затрат (инвестиций) i_t в году t , $t = 2024, 2025, \dots 2050$. При этом x_t, m_t, d_t измеряются по левым осям ординат, а y_t, n_t, i_t – по правым их осям.

Заметим, что вышеуказанный период совпадений может расширяться, по мере получения новых статистических данных. Это позволяет актуализировать вышеописанную модель и алгоритм, настраивая их параметры в будущем.

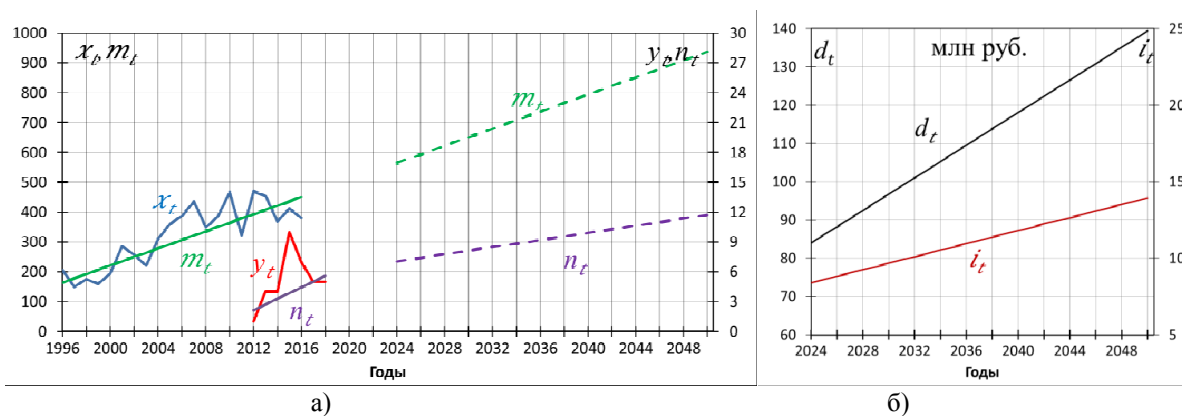


Рис. 1. а) - фактическое число x_t и линейный тренд среднего числа m_t явлений в году t ; фактическое число y_t , линейный тренд и прогноз среднего числа n_t происшествий в году t ; б) прогнозы ущерба d_t и затрат i_t в году t , $t = 2024, 2025, \dots 2050$.

3. Сезонные прогнозы гидрометеорологических факторов и региональные затраты на адаптацию

В разных регионах РФ могут потребоваться разные затраты на адаптацию ЖИ к ИК. Кроме того, воздействия некоторых гидрометеорологических факторов генерируют особенно опасные гидрометеорологические явления. Последние становятся причинами ЧС [10]. Разработанные в п.2 модель и метод планирования затрат могут быть модифицированы с учетом сезонных прогнозов таких гидрометеорологических факторов в разных регионах РФ.

Например, в работе [8] показано, что число происшествий на ЖИ РФ, вызванных гидрометеорологическими воздействиями в 2012-2018 гг., определяется, в основном, объемами (суммами) осадков. Рис. 2 иллюстрирует прогнозы распределения осадков на территории РФ [10]. В частности, из рис. 2 следует, что в зимние периоды на всей территории РФ прогнозируется увеличение средних сезонных сумм осадков. Это увеличивает число и интенсивность опасных гидрометеорологических явлений, которые, в свою очередь, становятся причинами более частых происшествий и больших ущербов в зимний период. Соответственно, можно прогнозировать увеличение в зимние периоды числа происшествий и ущербов от фактора средних сезонных сумм осадков на всей ЖИ РФ.

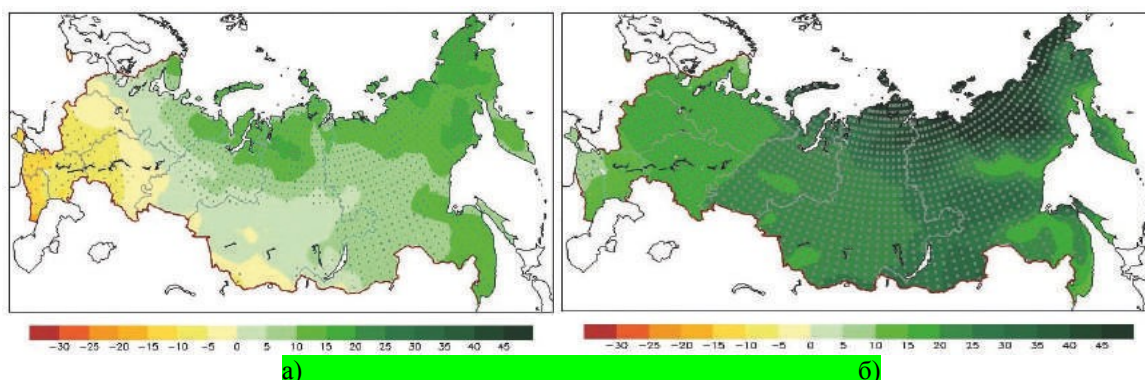


Рис. 2. Изменение средних сезонных сумм осадков (%) в период 2018-2100 гг. (по отношению к периоду 1995-2014 гг.) летом (а) и зимой (б) [2].

Покажем, как разработанные в п. 2 модель и алгоритм прогнозирования затрат на адаптацию можно увязать с региональными прогнозами средних сезонных сумм

осадков. Обозначим через g_j коэффициент повышения средних сезонных сумм осадков в j -м регионе РФ в зимний период. Как следует из рис. 2б, $1,05 \leq g_j \leq 1,45$. Соответственно, можно ожидать увеличения в g_j раз среднего числа опасных гидрометеорологических явлений m_t^j в j -м регионе: $m_t^j = g_j m_t$. Соответственно, по формулам (3)-(5) можно прогнозировать увеличение в зимние периоды числа происшествий $m_t^j = g_j m_t$, ущербов $d_t^j = g_j d_t$ и затрат (инвестиций) $i_t^j = g_j i_t$ на адаптацию ЖИ в j -м регионе, вследствие повышения средних сезонных сумм осадков в j -м регионе.

4. Заключение

Проактивный подход к решению проблем стратегического управления железнодорожной инфраструктурой предполагает выделение инвестиций на её адаптацию к изменениям климата.

Предложены модели и алгоритмы планирования таких инвестиций в условиях неполноты статистических данных, учитывающие сезонные прогнозы различных гидрометеорологических явлений в разных регионах РФ.

Указанные модели и алгоритмы были использованы при разработке предложений по управлению погодно-климатическими рисками для транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» в условиях меняющегося климата на период до 2050 года.

Список литературы

1. Стратегия пространственного развития РФ на период до 2025 года. Утв. распоряжением Правительства РФ от 13.02.2019. № 207-р.
2. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. Общее резюме. СПб.: Научно-технологические институты, 2022. 124 с.
3. Комплексное освоение территории РФ на основе транспортных пространственно-логистических коридоров. Актуальные проблемы реализации мегапроекта «Единая Евразия: ТЕПР – ИЕТС» / Под ред. В.В. Козлова и А.А. Маковского. М.: Наука, 2019. 463 с.
4. Последствия изменения климата для международных транспортных сетей и адаптация к ним. Нью-Йорк–Женева: ООН, 2013. 248 с.
5. Цыганов В.В., Малыгин И.Г., Еналеев А.К., Савушкин С.А. Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза. СПб.: ИПТ РАН, 2016. 216 с.
6. Малыгин И.Г., Гурлев И.В., Савушкин С.А., Маковский А.А., Мохов И.И., Еналеев А.К., Цвиркун А.Д., Цыганов В.В., Бородин В.А., Гавкалюк Б.В. Комплекс моделей для управления стратегическим развитием транспортной инфраструктуры Сибири, Дальнего Востока и Российской Арктики в условиях изменения климата. СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, ИПТ РАН, 2023. 122 с.
7. Цыганов В.В., Бородин В.А., Савушкин С.А. Сценарии влияния изменения климата на железнодорожную инфраструктуру // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2023. № 2 (21). С. 3-8.
8. Савушкин С.А., Искоростинский А.И., Лемешкова А.В. Климатические причины железнодорожных аварий // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2023. № 2 (21). С. 19-24.
9. Цыганов В.В., Савушкин С.А., Лемешкова А.В. Динамика железнодорожных происшествий, ущербов и затрат на их ликвидацию // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2023. № 2 (21). С. 14-19.
10. Савушкин С.А., Горбунов В.Г., Лемешкова А.В. Методы оценки стоимости адаптации железнодорожной инфраструктуры к изменению климата // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2023. № 2 (21). С. 8-14.
11. Доклад о климатических рисках на территории РФ / Под ред. В.М. Катцова. СПб.: Климатический центр Росгидромета, 2017. 106 с. <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/riski.pdf> (дата обращения 16.12.2023).