

## **Моделирование и картографирование зон наводнений редкой повторяемости (на примере Иркутской области)**

**Олтян И.Ю.**, к. т. н., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), уч. секретарь института, г. Москва, Россия

SPIN-код: 3476-5213

**Арефьева Е.В.**, д. т. н., доц., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), гл. н. с. науч.-исслед. центра, г. Москва, Россия; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева (КНИТУ – КАИ), проф. кафедры промышленной и экологической безопасности, г. Казань, Россия

SPIN-код: 2738-6323

### **Аннотация**

Представлены краткое описание и некоторые результаты применения метода расчета значений параметров катастрофических наводнений на неизученных и слабоизученных территориях в целях оценки риска чрезвычайных ситуаций, а также картографирования и моделирования катастрофических наводнений с применением цифровой модели рельефа.

**Ключевые слова:** наводнение; моделирование; картографирование; максимальный расход; виртуальный гидропост; цифровая модель рельефа; ориентированный граф.

В июне 2019 года в Иркутской области в результате воздействия комплекса неблагоприятных метеорологических явлений, сопровождающихся подъемом уровня воды до катастрофических отметок на реках: Бирюса, Уда, Ут, Ия, Икейка, Чуна, Зима и Кирей, пострадало более 46 700 чел., в том числе 26 чел. погибло [1]. Это наводнение стало самым крупным<sup>1</sup> за последние 180 лет. В связи с этим моделирование и картографирование наводнений редкой повторяемости (1 раз в 100–200 лет) становится актуальной научной и прикладной задачей.

---

<sup>1</sup> <http://baik-info.ru/samoe-krupnoe-za-180-let-hronika-navodneniya-v-priangare?ysclid=lj7bf06wv8402859085>.

Задача моделирования наводнений редкой повторяемости сводится к следующим подзадачам:

- прогнозирование подъема уровня воды (прогнозирование глубины затопления (*waterdepth*) на фактических гидропостах по данным многолетних наблюдений наивысших наблюдаемых уровней воды относительно нуля гидропоста для каждой обеспеченности;

- прогнозирование подъема уровня воды (прогнозирование глубины затопления) (*waterdepth*) на «виртуальных» гидропостах: произвольных виртуальных точек на местности, идентифицируемых по географическим координатам, не оборудованных пунктами гидрологического наблюдения, искусственно «размещенных» в фарватере реки, в зависимости от максимально прогнозируемого расхода воды, объема стока воды, модуля и слоя стока воды, площади поперечного сечения русла реки в месте размещения «виртуального» гидропоста;

- определение зоны возможного затопления.

Для определения подъема уровня воды (прогнозирование глубины затопления) (*waterdepth*) на фактических гидропостах строится уравнение логарифмической регрессии:

$$waterdepth = b_0 \times \ln(P_{m,\%}) + b_1, \text{ см}, \quad (1)$$

где  $b_0$ , см/%,  $b_1$ , см — коэффициенты логарифмической регрессии.

Эмпирическая кривая ежегодной вероятности превышения  $P_{m,\%}$  строится на основе данных многолетних наблюдений наивысших наблюденных уровней воды по формуле [2]:

$$P_{m,\%} = \frac{m}{n+1} \times 100, \%, \quad (2)$$

где:

$m$  — порядковый номер членов ряда наивысших наблюдавшихся уровней воды, расположенных в убывающем порядке, натуральное число;

$n$  — общее число членов ряда, натуральное число.

Коэффициенты уравнения регрессии (1) определяются методом наименьших квадратов.

Для определения подъема уровня воды (прогнозирование глубины затопления) (*waterdepth*) на «виртуальных» гидропостах разработан оригинальный метод вероятностного моделирования максимального подъема уровня воды, основанный на построении русловой сети как ориентированного графа, использовании цифровой модели рельефа и ГИС. Разработанный метод подробно описан в работе [3], результаты применения метода — в работах [4, 5].

Моделирование и картографирование зон наводнений редкой повторяемости выполнены для территории Иркутской области.

Общая длина рек Иркутской области — 309355 км [3]. По данным Росгидромета [6], в Иркутской области, по состоянию на декабрь 2022 года, действовал 131 гидропост (рис. 1), что соответствует в среднем 1 гидропосту на 2361 км. Вместе с тем в Иркутской области существует 2100 населенных пунктов, расположенных вблизи рек, и большинство населенных пунктов не имеет пунктов регулярных инструментальных гидрологических измерений.

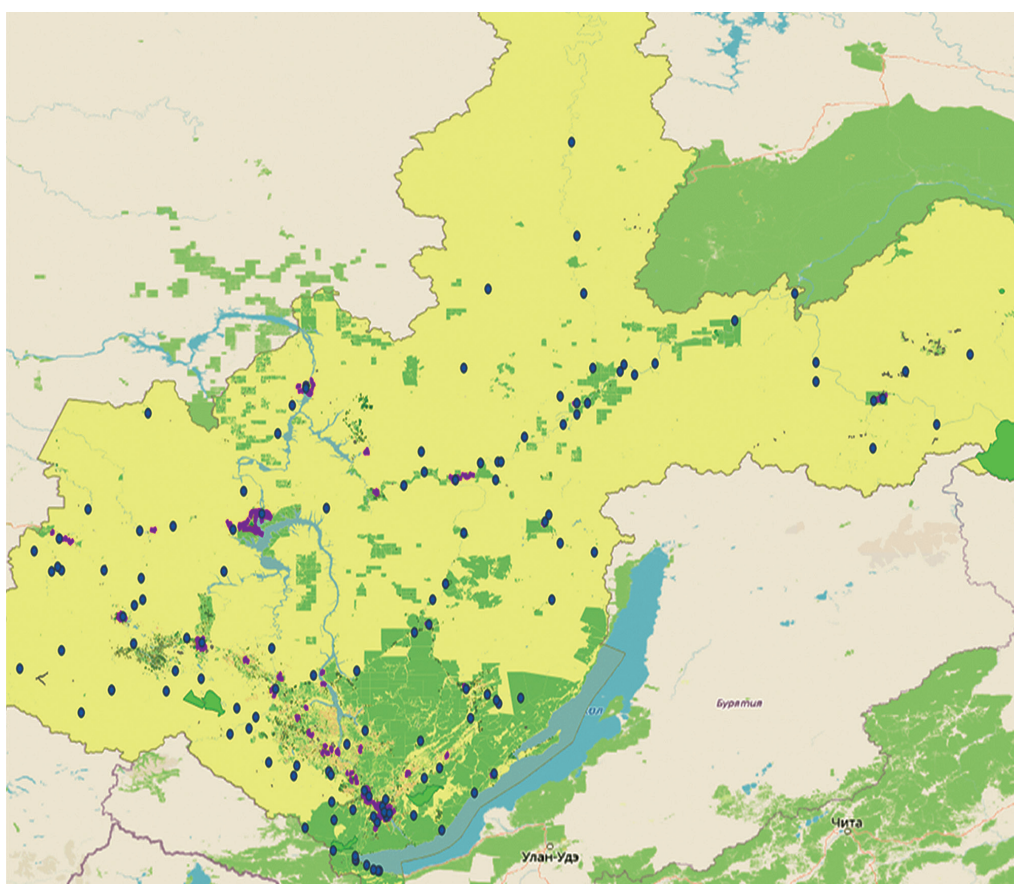


Рис. 1. Расположение фактических гидропостов<sup>2</sup> на карте Иркутской области

<sup>2</sup> Сайт ЕСИМО. URL: [http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU\\_RIHMI-WDC\\_2665](http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_2665).

Важным этапом при выполнении моделирования и картографирования зон наводнений редкой повторяемости является расстановка виртуальных гидропостов [3, 4]. Всего было «расставлено» около 2000 виртуальных гидропостов (рис. 2).

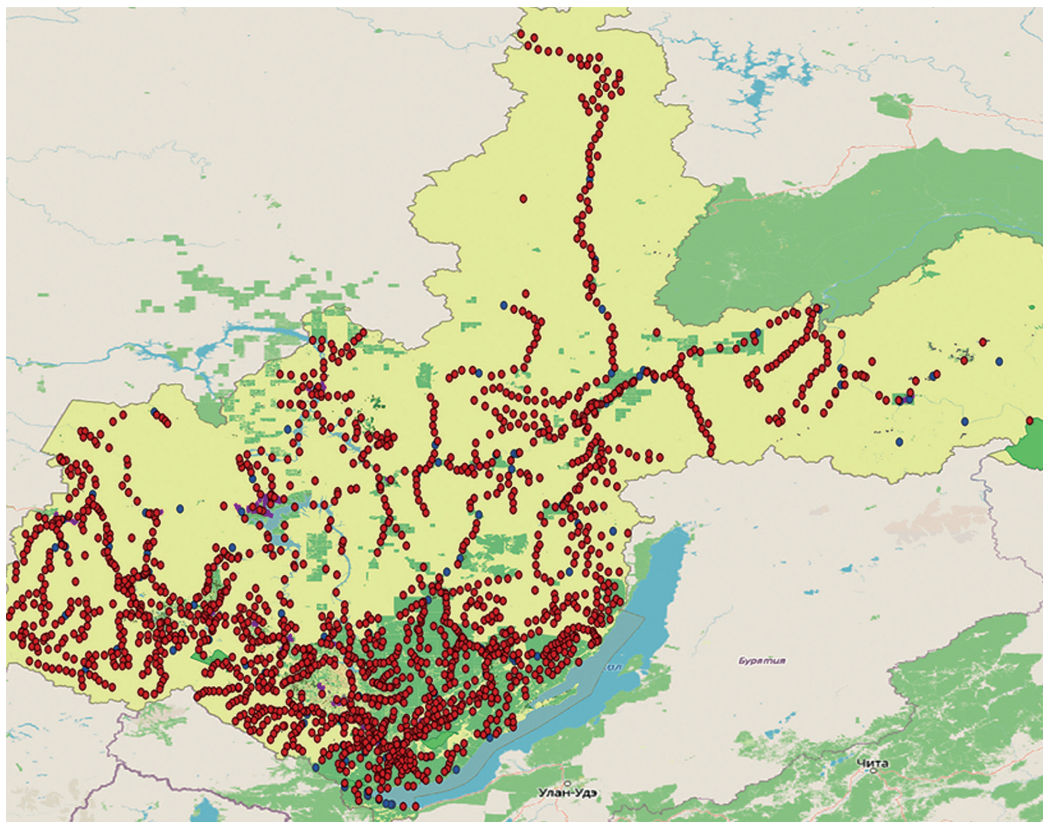


Рис. 2. Расположение фактических (синие точки) и виртуальных гидрологических постов (красные точки) на карте Иркутской области [5]

Анализ статистических данных по наводнениям в Иркутской области [7] показывает, что максимальные уровни воды достигаются, как правило, в мае-июле, что подтверждает тот факт, что максимальный уровень воды и максимальный расход воды зависят от:

- запасов воды в снежном покрове перед началом весеннего таяния;
- количества атмосферных осадков в период снеготаяния и половодья;
- глубины промерзания почвы к началу снеготаяния;
- наличия и толщины ледяной корки на почве;
- интенсивности снеготаяния;
- сочетания половодья крупных притоков бассейна;
- озерности, заболоченности и лесистости бассейна;
- других факторов.



Авторами предложен подход, согласно которому моделирование процесса наводнения выполняется в зоне формирования поверхностного стока, без учета поверхностного слоя почвы, подстилающего его более глубокого слоя, емкости грунтовых вод [5].

Основной гидрологической характеристикой, определяющей подъем уровня воды, является максимальный расход для каждой обеспеченности, определяемый по редуccionной формуле [2]:

$$Q_{pmaxi} = q_{200} \left( \frac{200}{S\_basin_i} \right)^n \times \lambda_p \times \delta_1 \times \delta_2 \times S\_basin_i, \quad (3)$$

где:

$q_{200}$  — модуль максимального расхода воды с вероятностью ежегодного превышения 1%, приведенной к площади водосбора 200 км<sup>2</sup>;

$n$  — показатель степени редуccionии модуля максимального расхода, определяется по карте максимальных модулей дождевого стока рек СССР;

$S\_basin_i$  — площадь водосбора в  $i$ -ом пункте гидрологического наблюдения;  $\lambda_p$  — переходный коэффициент от вероятности превышения 1% к вероятности  $p$ .

Для виртуальных гидропостов глубина затопления (*waterdepth*) заданной обеспеченности (*frequency*) определяется по графику кривой расходов, приведенной в общем виде:

$$H = f(Q), \quad (4)$$

где:

$Q$  — расход, м<sup>3</sup>/с;

$h$  — глубина затопления, м.

Разработан алгоритм, позволяющий моделировать зоны вероятного затопления с использованием теории графов и цифровой модели рельефа (ЦМР). В разработанном алгоритме русловая сеть в пределах каждого бассейна представляется как ориентированный граф (орграф)  $G = (V, E)$  с информацией о стоке, где каждый узел в наборе узлов  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  хранит координаты ячейки ( $lon\_x, lat\_y$ ) в ЦМР, высоту ячейки (*height*) ЦМР над уровнем моря, количество ячеек,

которые «стекают» в данную ячейку (*acc\_flow*), а каждое ребро  $v_i \rightarrow v_j \cdot E$  показывает, что узел  $v_i$  является родительским узлом для потомка — узла  $v_j$  (вода «вытекает» из узла  $v_i$  и «принимается» узлом  $v_j$ ) [3–5].

Использование ЦМР, расчетных зависимостей и эмпирических коэффициентов, представленных в действующих сводах правил, позволяет моделировать зоны вероятного затопления различной обеспеченности как на стационарных, так и на «виртуальных» гидропостах [5].

Для различных фактических гидропостов и ВГП рассчитаны основные гидрологические параметры (максимальный расход, высота подъема уровня воды, длительность периода затопления и глубина затопления для различных обеспеченностей) на основе подходов, изложенных в методических рекомендациях [8–10], и с использованием оригинального подхода [3], также определены зоны вероятного затопления (рис. 3, 4).

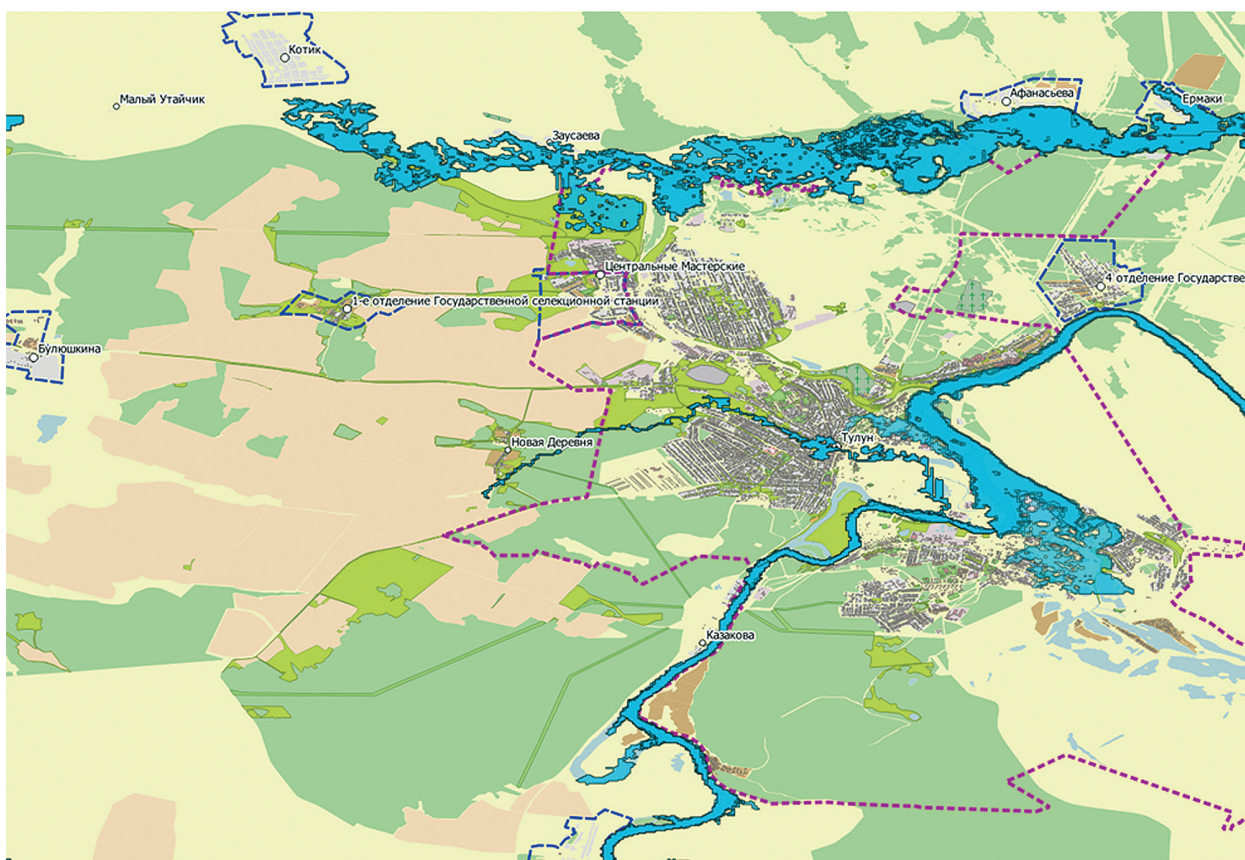


Рис. 3. Фрагмент зоны вероятного затопления обеспеченностью 0,5% (повторяемостью 1 раз в 200 лет) в районе г. Тулуна (Иркутская область)

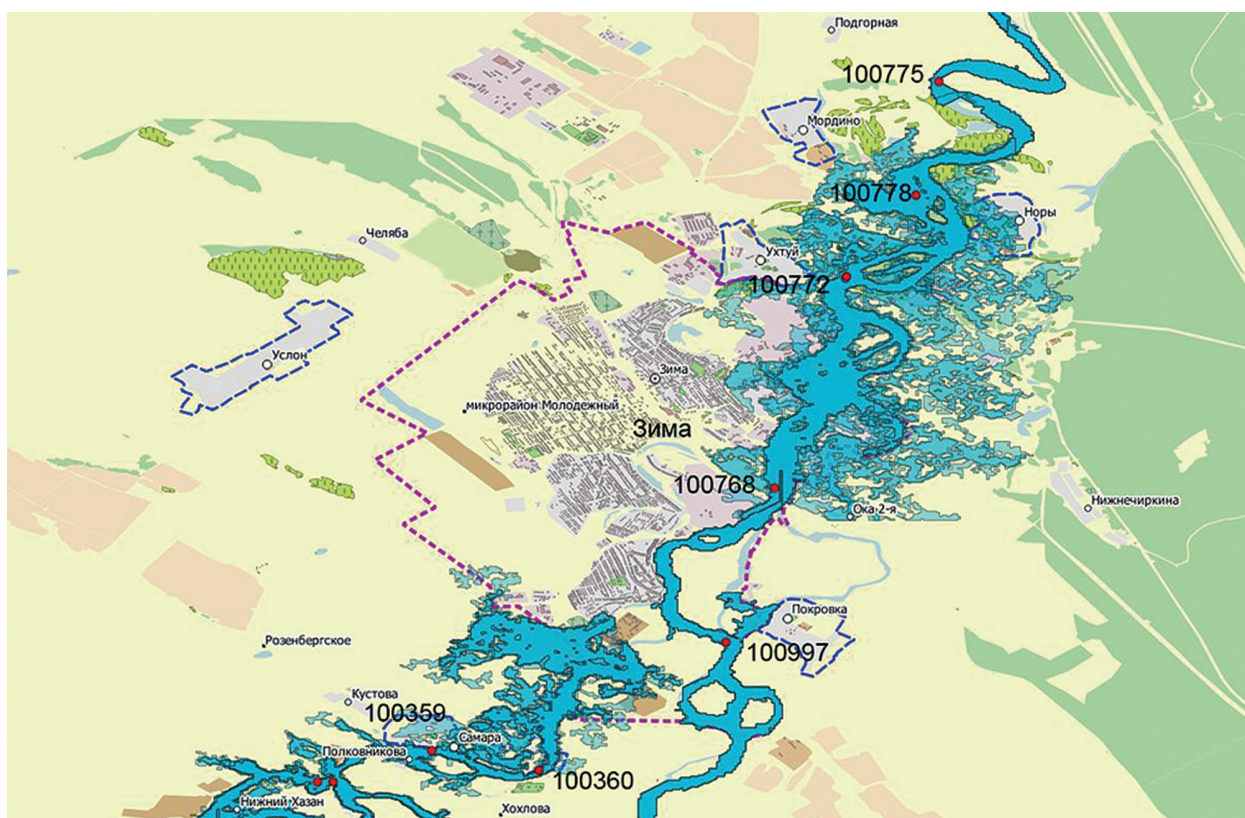


Рис. 4. Фрагмент зоны вероятного затопления обеспеченностью 0,5% (повторяемостью 1 раз в 200 лет) в районе населенного пункта Зима (Иркутская область)

Сформированы наборы пространственных данных в формате файла *shape*, включающие информацию о гидропостах (фактических и виртуальных) и зонах затопления, с рассчитанными параметрами глубины и длительности затопления для каждой обеспеченности.

Полученные зоны затопления позволят определять индекс подверженности территории наводнениям в рамках технологии дистанционной оценки риска [11].

### Список использованных источников

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2019 году» // URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/4602?ysclid=lj87ia2orw500136804> (дата обращения: 23.06.2023).
2. СП 33-1012003. Определение основных гидрологических характеристик.



3. О методе прогнозирования параметров катастрофических наводнений на неизученных территориях в целях оценки риска чрезвычайных ситуаций / А. Н. Щеглов, К. Ю. Жалнин, И. Ю. Олтян, Е. В. Арефьева, М. В. Болгов, А. С. Котосонов, Ю. К. Чяснавичюс, Е. Б. Сергеев, Н. Н. Олтян // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 3(73). С. 78–83. EDN: MXDHWZ.
4. Результаты расчетов гидрологических параметров для оценки риска ЧС на неизученных территориях на основе моделирования катастрофических наводнений / А. Н. Щеглов, И. Ю. Олтян, Г. Радионов, Е. В. Арефьева, М. В. Болгов, Ю. К. Чяснавичюс, Е. Б. Сергеев, Н. Н. Олтян, А. С. Котосонов, И. В. Жданенко // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 4(74). С. 4–12. EDN: MXDHWZ.
5. О результатах применения метода прогнозирования параметров катастрофических наводнений на неизученных территориях в целях оценки риска чрезвычайных ситуаций / А. Н. Щеглов, И. Ю. Олтян, Е. В. Арефьева и др. // Технологии гражданской безопасности. 2023. Т. 20. № 1(75). С. 48–56. EDN: CZWUUT.
6. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2021 году, Росгидромет, 2022 // URL: <http://hydrology.ru/ru/content/obzor-sostoyaniya-sistemy-gidrologicheskikh-nablyudeniy-obrabotki-dannyh-i-podgotovki-7> (дата обращения: 23.06.2023).
7. Масштабы и опасность наводнений в регионах России / В. В. Разумов, С. А. Качанов, Н. В. Разумова и др. — М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2018. 364 с.
8. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных наблюдений. СПб.: Ротапринт ГНЦ ААНИИ, 2007. 66 с.
9. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: ГГИ, Нестор–История, 2009. 190 с.
10. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. Нижний Новгород: Типография «Вектор–ТиС», 2007. 134 с.
11. Oltyan I.Y. Remote assessment of an integrated emergency risk index / I. Y. Oltyan, E. V. Arefyeva, A. S. Kotosonov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, ICCATS2020, Sochi, 06–12 сентября 2020 года. Vol. 962, 4. Sochi: IOP Publishing Ltd, 2020. P. 042053. DOI 10.1088/1757-899X/962/4/042053. EDN: XJGGYQ.