

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК

Санкт-Петербургского
государственного университета
технологии и дизайна



Серия 1

Естественные
и технические науки

№ 1/2022

А. В. Епифанов¹, Н. Ю. Абрамов², М. А. Епифанова¹, В. И. Клязьмин², Г. Я. Фролов¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна 191186 РФ, Санкт-Петербург, Большая Морская, 18

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения 190000 РФ, Санкт-Петербург, Большая Морская, 67

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА МОДЕЛИ ВЕТРОВЫХ ТЕЧЕНИЙ

© А. В. Епифанов, Н. Ю. Абрамов, М. А. Епифанова, В. И. Клязьмин, Г. Я. Фролов, 2022

Представлены теоретические основы расчета ветровых течений для неглубоких водных объектов, разработан алгоритм расчета поля глубин для каждой расчетной ячейки по имеющимся дискретным данным, реализована автоматическая функция построения 3D-модели дна, определено оптимальное количество итераций расчета полных потоков, разработано и апробировано современное программное обеспечение по расчету ветровых течений, позволяющее работать с современными картографическими сервисами и офисными приложениями.

Ключевые слова: физико-математическое моделирование, разработка программного обеспечения, ветровые течения.

Математическое моделирование процессов переноса загрязняющих веществ в водных объектах находит широкое применение на практике в таких областях, как расчеты нормативов допустимых сбросов предприятий, оценка влияния на водные биоресурсы при дноуглубительных и гидротехнических работах, а также оценке воздействия гидрологических и метеорологических факторов на перенос загрязняющих веществ.

Процессы переноса загрязняющих веществ в водных объектах достаточно сложны и зависят от значительного числа управляющих параметров, поэтому на практике, как правило, используют программное обеспечение.

Авторским коллективом Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения и Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна разработана программа, позволяющая упростить расчеты негативных воздействий на водные объекты в рамках расчетов нормативов допустимых сбросов, разработки разделов охраны окружающей среды в проектной документации и оценки воздействия на водные объекты. Авторы имеют опыт в разработке программного обеспечения, которое реализует математическое моделирование в области поведения водных объектов [2].

На данный момент существует большое разнообразие программного обеспечения, позволяющего производить моделирование переноса загрязняющих веществ. Созданная программа имеет следующие преимущества по сравнению с аналогами:

- Возможность производить расчеты негативного воздействия на водные объекты не только от сосредоточенных, но и от диффузных источников загрязнения;
- Возможность учитывать воздействие от нескольких источников загрязнения;
- Возможность расчета НДС при условиях, не предусмотренных действующей методикой расчета нормативов допустимых сбросов [1].

– Современный программный интерфейс, позволяющий работать с google картами

Решающую роль в направлении и скорости переноса играет течение в водном объекте. У водоемов течение может быть направлено в любую сторону и зависит в том числе от направления и силы ветра [3]–[7]. Для неглубоких водоемов (глубина менее 100 м.), как было доказано в многочисленных исследованиях, можно использовать двумерную математическую модель ветровых течений П. С. Линейкина и А. И. Фельзенбаума [5]. В данной модели учитывается неравномерность ветра, рельеф дна, конфигурация береговой линии, турбулентный обмен количеством движения в вертикальном направлении, наклоны поверхности воды, уклон дна и трение о поверхность дна.

В основе модели лежат следующие уравнения:

– основное уравнение гидростатики:

$$-g\rho_0 = \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения; $\rho_0 = const$ — плотность воды.

– Уравнение установившегося движения в мелком море:

$$A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

$$A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{\partial p}{\partial y}; \quad (3)$$

где u, v — компоненты скорости течения по осям x и y соответственно; p — давление; A_z — коэффициент турбулентного обмена количеством движения в вертикальном направлении.

– Уравнение неразрывности потока:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где w — компонента скорости течения по оси z .

– Трение в морской воде компенсирует тангенциальное давление ветра на поверхности водной глади:

$$\begin{aligned} A_z \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=0} &= -T_x; \\ A_z \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=0} &= -T_y. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение, которое описывает движение:

$$\begin{aligned} A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} &= -g \rho_0 \frac{\partial \xi}{\partial x}, \\ A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} &= -g \rho_0 \frac{\partial \xi}{\partial y}. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения 1–6 приведены к линейному виду для упрощения расчетов в среде программирования. Для этого водный объект разбивается на прямоугольную сетку (лучше на квадратную) с шагом x и y , после чего удаляются клетки, в которых водный объект занимает меньше половины площади. Полученная форма сетки будет отображать очертания водного объекта.

Следующим шагом будет ввод входных данных. Для этого в каждую ячейку записываются компоненты скорости ветра по осям x и y , а также глубина. В результате получится три поля данных.

После ввода входных параметров программа может произвести расчеты:

1. Компоненты тангенциального давления ветра (T_x и T_y , дн/см²):

$$\begin{aligned} T_x &= \gamma \cdot w_x \cdot |w_x|, \\ T_y &= \gamma \cdot w_y \cdot |w_y|; \end{aligned} \quad (7)$$

где γ — коэффициент, равный 0,032 (скорость ветра измеряется при этом в м/сек., а тангенциальное давление — в дн/см²), w_x и w_y — проекции скоростей ветра на ось x и ось y соответственно.

Функция $rotT$:

$$rotT = \frac{1}{2x} \cdot (T_{y(4)} - T_{y(2)} - T_{x(3)} + T_{x(1)}). \quad (8)$$

Значения $T_{y(4)}$ и $T_{y(2)}$ принимаются из ранее рассчитанных T_y , а значения $T_{x(3)}$ и $T_{x(1)}$ — для T_x . На рис. 1 представлено, как располагаются ячейки относительно друг друга.

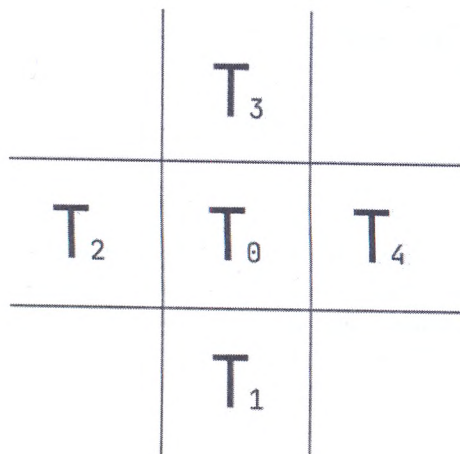


Рис. 1. Расположение ячеек

Функция f_0 :

$$f_0 = \frac{rotT \cdot 200 \cdot x}{\gamma}. \quad (9)$$

Функция ψ_0 . Вычисления необходимо производить несколько раз до тех пор, пока два последовательных расчета не совпадут до заданной точности. Согласно алгоритму, предложенного Фельзенбаумом [5], в инженерных расчетах обычно достаточно 14–16 итераций. Однако проведенные в ходе работы расчеты показали, что точность результатов моделирования может быть увеличена на 3–10% при увеличении числа итераций до 100. В разработанном программном продукте пользователь выбирает необходимую точность расчетов и программа в автоматизированном режиме рассчитывает число необходимых итераций.

Первый расчет:

$$\bar{\psi}_0 = \frac{1}{4} \cdot (f_{0(1)} + f_{0(2)} + f_{0(3)} + f_{0(4)}) - f_0 \quad (10)$$

Последующие расчеты:

$$\bar{\psi}_0 = \frac{1}{4} \cdot (\bar{\psi}_1 + \bar{\psi}_2 + \bar{\psi}_3 + \bar{\psi}_4) - f_0 \quad (11)$$

Функция полных потоков:

$$\psi = \bar{\psi} \cdot H \quad (12)$$

Компоненты скорости течения на заданном горизонте z :

$$\begin{aligned} u &= \frac{3 \cdot (H^2 - z^2) \cdot (\psi_4 - \psi_2)}{4 \cdot H^3} + \frac{T_y}{4 \cdot A_z} \cdot (H^2 - 4 \cdot H \cdot z + 3 \cdot z^2); \\ v &= \frac{3 \cdot (H^2 - z^2) \cdot (\psi_3 - \psi_1)}{4 \cdot H^3} + \frac{T_x}{4 \cdot A_z} \cdot (H^2 - 4 \cdot H \cdot z + 3 \cdot z^2). \end{aligned} \quad (13)$$

В частности, на поверхности:

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{3 \cdot (\psi_4 - \psi_2)}{4 \cdot h \cdot H} + \frac{T_y \cdot H}{4 \cdot A_z}; \\ v_0 &= \frac{3 \cdot (\psi_3 - \psi_1)}{4 \cdot h \cdot H} + \frac{T_x \cdot H}{4 \cdot A_z}. \end{aligned} \quad (14)$$

Разработанное программное обеспечение позволяет создавать картографическую подложку с помощью Google Карт. В программе реализованы алгоритмы трилинейной триангуляции, позволяющие рассчитывать недостающие значения глубин в зависимости от пространственного распределения имеющихся данных.

Для реализации данного алгоритма был выбран язык C++.

C++ — компилируемый язык программирования. Данный язык был выбран ввиду ряда причин.

У языка одна из самых быстрых скоростей исполнения кода, быстрее него только C и Rust. Но в C отсутствует парадигма объектно-ориентированного программирования, а также нет гибких и мощных модулей и средств для разработки пользовательских интерфейсов для приложений для настольных персональных компьютеров из-за чего разработка была бы более трудо- и времязатратной. К тому же C более не поддерживается, обновления в язык не приходят, а значит ошибки не исправляются и не появляются



Рис. 2. Интерфейс главной формы

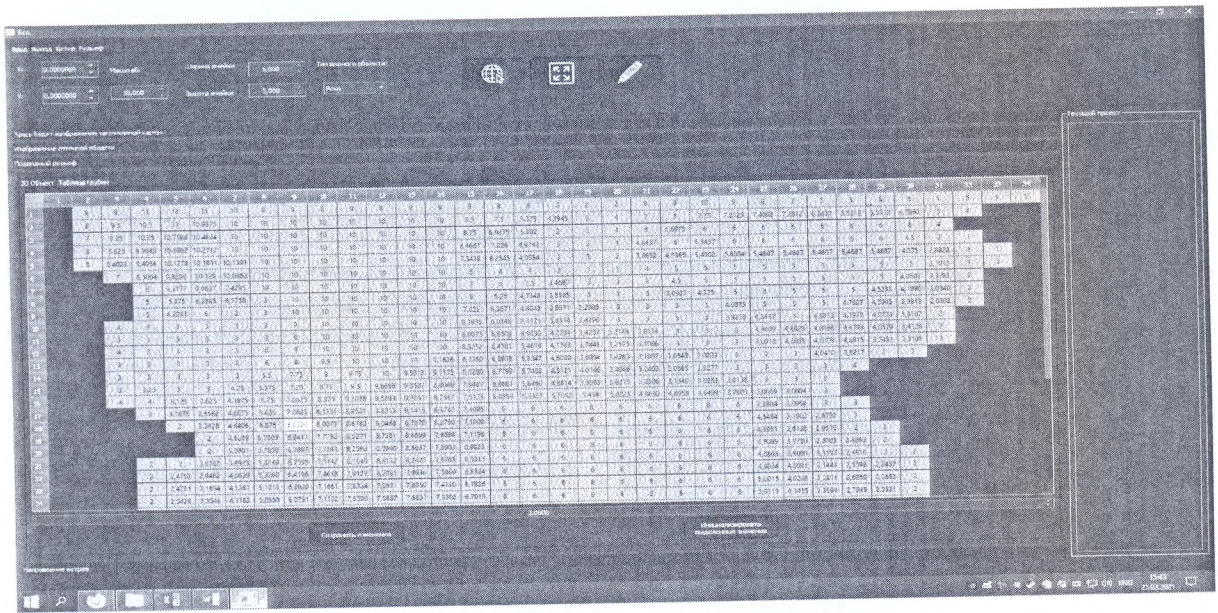


Рис. 3. Поле глубин

новые возможности, которые ускоряют работу языка и разработки. В Rust же присутствует парадигма ООП и в аспекте скорости он обходит C++, но в нем, так же как и в C, нет необходимых средств для разработки пользовательских интерфейсов.

Программное обеспечение в автоматизированном режиме позволяет строить расчетную сеточную область на основе картографического материала загруженного с google карт. В функции пользователя входит только определение геометрических размеров одной ячейки, рис. 2.

После ввода всех исходных данных, согласно математической модели представленной выше, про-

граммное обеспечение для каждой ячейки определяет значение глубины. В программе реализована трилинейная интерполяция глубин, которая позволяет по известным значениям глубин в отдельных ячейках рассчитать значения глубин для каждой из ячеек расчетного поля. Пример про интерполированного в программном обеспечении поля глубин приведен на рис. 3.

Программное обеспечение позволяет в автоматизированном режиме строить 3D-модель дна (рис. 4).

В результате расчетов формируется поле векторов скоростей течений с указанием их абсолютных значений. Эти данные можно экспортировать в таблицу Excel. Для большей наглядности результатов

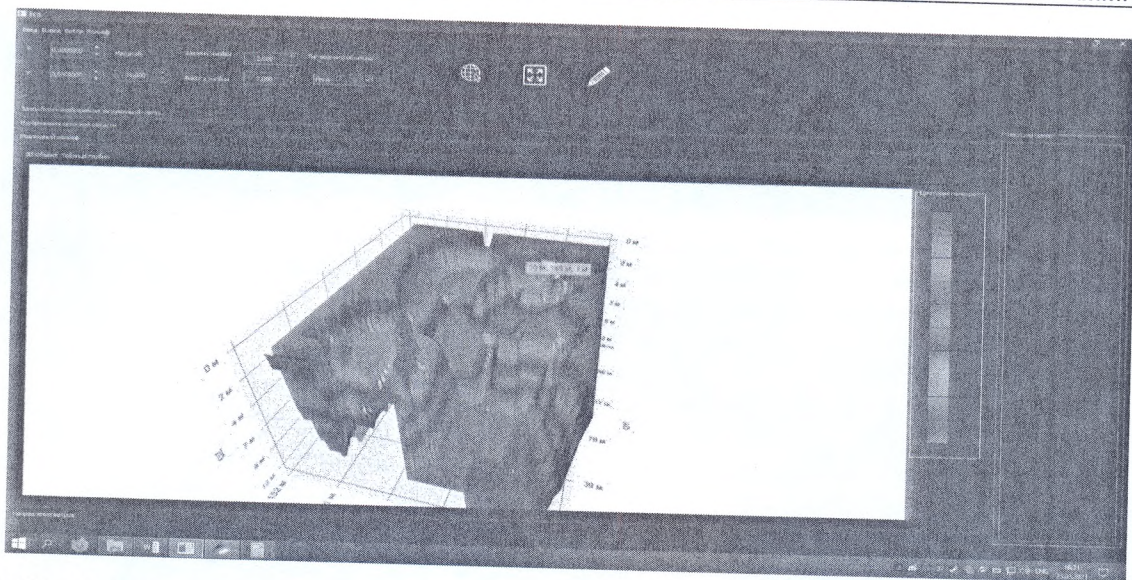


Рис. 4. 3D-модель дна

		10	10	10	10							
10	10	12	11,9	12,2	12,7	12,5	10,3	10				
10	10,5	12,1	13,0	15	15	15	12,5	10	11	11	11	11
10	12,1	12,7	13,7	15	15	15	15	12,1	12,0	15	12	12
10	10	15	12,8	14,2	15	15	15	15	12,1	12,1	12	12
		12	12	13	13,1	14,3	14,3	13,5	12,9	11	12	12
				12	12	12	13,1	13,9	12,3	12,4	12	12
						12	12	12	12	12	12	12

Рис. 5. Результат расчетов, выведенный в Excel

используется заливка ячеек. Чем интенсивнее цвет, тем больше значение скорости течения. Пример значений абсолютных скоростей течений приведен на рис. 5.

Рассчитанные величины скоростей течений по разработанной программе были верифицированы по результатам натуральных наблюдений в районах сбросов сточных вод Сеgezского и Кондопожского целлюлозно-бумажных комбинатов. Результаты натуральных наблюдений подтвердили достаточную точность разработанного программного обеспечения. Отклонения рассчитанных величин течений не превышали измеренные значения более чем на 18%.

Выводы

В статье представлены теоретические основы расчета ветровых течений для неглубоких водных объектов на примере модели П. С. Линейкина и А. И. Фельзенбаума. Для данной модели определено оптимальное количество итераций расчета полных потоков, показавшее, что увеличение числа итераций с общепринятых 14–16 до 100 повышает точность расчетов на 3–10%.

Реализован алгоритм расчета поля глубин для каждой расчетной ячейки по имеющимся дискретным данным и функция автоматического построения 3D-модели дна. Разработано и апробировано современное программное обеспечение по расчету ветровых течений, позволяющее работать с современными картографическими сервисами и офисными приложением.

ями. Результаты верификации математической модели показали сходимость расчетных значений с данными натуральных наблюдений на допустимом для инженерных расчетов уровне.

Список литературы

1. Приказ Минприроды России от 17 мая 2021 года № 333 «О внесении изменений в приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29 декабря 2020 г. N 1118 «Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей»». URL: <https://docs.cntd.ru/document/603727896> (дата обращения: 09.11.2021)
2. Фролов Г. Я., Епифанов А. В. Свид. 2019662768. «Water pollution» /; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «СПбГУПТД» (RU); заявл. 26.06.19; опубл. 02.10.19, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.
3. Зайцев Н. А., Критский Б. В. Расчет течений жидкости Ван дер Ваальса в модели диффузного интерфейса на адаптивных сетках. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2018. 20 с.
4. Бураго Н. Г., Герман В. А., Никитин А. Д., Никитин И. С. Расчет нестационарных течений мелкой воды в условиях переменной геометрии. М.: Институт проблем механики РАН, 2019. 34 с.
5. Современные проблемы динамики океана и атмосферы: сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П. С. Линейкина. ГУ «Гидрометцентр России» /

- под ред. А. В. Фролова и Ю. Д. Реснянского. М.: Триада ЛТД, 2010. 387 с.
6. Архипов Б. В., Котеров В. Н., Солбаков В. В., Шапочкин Д. А. Моделирование турбулентного рассеивания загрязняющих веществ в морской среде. Рос. акад. наук, ВЦ им. А. А. Дородницына. М.: ВЦ РАН, 2005. 52 с.
 7. Елизарова Т. Г., Широков И. А. Регуляризованные уравнения и примеры их использования при моделировании газодинамических течений: монография. М.: МАКС Пресс, 2017. 135 с.
 8. Жильникова Н. А., Шишкин А. И., Епифанов А. В., Епифанова М. А. программное обеспечение нормирования нагрузки в сложных водохозяйственных системах // *Вопросы радиоэлектроники*. 2017. № 10. С. 48–51.
 9. Фролов Г. Я., Епифанов А. В. Разработка эмпирического метода оценки применимости стационарной модели расчета ветровых течений // *Вестник Санкт — Петербургского государственного университета технологии и дизайна*. Серия 1. Естественные и технические науки. 2021. № 1. С. 78–81.
 10. Benedini M., Tsakiris G. *Water Quality Modelling for Rivers and Streams*. Dordrecht: Springer, 2013, 288 p.
 11. Shishkin A., Chusov A., Epifanova M., Silka D. Functional Model That Evaluates the Impact of Hydrotechnical Works and Facilities on a Water Object /Ed. Murgul V., Popovic Z.: *Proceedings of International Scientific Conference «Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport — EMMFT 2017» //Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. Vol. 692. Springer, Cham.

A. V. Epifanov¹, N. Yu. Abramov², M. A. Epifanova¹, V. I. Klyazmin², G. Ya. Frolov¹

¹ St. Petersburg State University of Technologies and Design
191186 Russia, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 18

² St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
190000 Russia, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya str., 67

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR CALCULATING THE MODEL OF WIND CURRENTS

The theoretical foundations for calculating wind currents for shallow water bodies are presented, an algorithm for calculating the depth field for each calculation cell using the available discrete data is developed, an automatic function for constructing a 3D bottom model is implemented, the optimal number of iterations for calculating total flows is determined, modern software for calculating wind currents, allowing you to work with modern mapping services and office applications.

Keywords: physical and mathematical modeling, software development, wind currents.

References

1. Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated May 17, 2021 No. 333 «On Amendments to the Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated December 29, 2020 No. 1118 «On Approval of the Methodology for Developing Standards for Permissible Discharges of Pollutants into Water bodies for Water Users»». URL: <https://docs.cntd.ru/document/603727896> (accessed: 09.11.2021) (in Rus.).
2. Frolov G. Ya., Epifanov A. V. Svid. 2019662768. «Water pollution» /; applicant and copyright holder of SPbGUPTD (RF); application 26.06.19; publ. 02.10.19, Register of computer programs. 1 p. (in Rus.).
3. Zaitsev N. A., Kritskiy B. V. Calculation of Van der Waals fluid flows in a diffuse interface model on adaptive grids M.: M. V. Keldysh IPM RAS, 2018. 20 p. (in Rus.).
4. Burago N. G., Herman V. A., Nikitin A. D., Nikitin I. S. Calculation of unsteady shallow water flows in conditions of variable geometry. M.: Institute of Problems of Mechanics of the Russian Academy of Sciences, 2019. 34 p. (in Rus.).
5. Modern problems of ocean and atmospheric dynamics: a collection of articles dedicated to the 100th anniversary of the birth of prof. P. S. Linikin. State Institution «Hydrometeorological Center of Russia» / Ed. A. V. Frolov and Yu. D. Resnyansky. M.: Triada LTD, 2010. 387 p. (in Rus.).
6. Arkhipov B. V., Koterov V. N., Solbakov V. V., Shapochkin D. A. Modeling of turbulent dispersion of pollutants in the marine environment. Russian Academy of Sciences, A. A. Dorodnitsyn VC. M.: VC RAS, 2005. 52 p. (in Rus.).
7. Elizarova T. G., Shirokov I. A. Regularized equations and examples of their use in modeling gas-dynamic flows: monograph. M.: MAKS Press, 2017. 135 p. (in Rus.).
8. Zhilnikova N. A., Shishkin A. I., Epifanov A. V., Epifanova M. A. software for load rationing in complex water management systems // *Voprosy radioelectronics*. 2017. No. 10. pp. 48–51 (in Rus.).
9. Frolov G. Ya., Epifanov A. V. Development of an empirical method for assessing the applicability of a stationary model for calculating wind currents // *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design*. Series 1. Natural and technical sciences. 2021. No. 1. pp. 78–81 (in Rus.).
10. Benedini M., Tsakiris G. *Modeling of water quality for rivers and streams*. Dordrecht: Springer, 2013, 288 p.
11. Shishkin A., Chusov A., Epifanova M., Silka D. A functional model evaluating the impact of hydraulic engineering works and structures on a water body /Ed. Murgul V., Popovich Z.: *Materials of the International Scientific Conference «Energy Consumption Management of urban transport and Transport facilities — EMMFT 2017» // Achievements in the field of intelligent systems and computing*. 2018. Volume 692. Springer, Cham.