

## review article

# The Constructive Operators of the Working Mind: A Developmental Account of Mental-Attentional Capacity

**Marie Arsalidou**

Department of Psychology, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation;  
Psychology Department, York University, Toronto, Canada

**Juan Pascual-Leone**

Psychology Department, York University, Toronto, Canada

**Janice M. Johnson**

Psychology Department, York University, Toronto, Canada

**Tatyana Kotova**

Cognitive Research Lab, Russian Academy for National Economy and Public Administration, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Many psychological theories attempt to explain the mechanisms that govern cognition in adults, and fewer theories attempt to explain also how cognitive mechanisms change across development. Even fewer theories provide a brain representation of mechanisms related to cognitive development. One such theory is the Theory of Constructive Operators. In this review, we present key components of this general theory and provide quantitative predictions for the development of core cognitive abilities such as a mental-attentional capacity. Specifically, the model of endogenous mental attention presents a domain-free resource that increases in power during childhood and adolescence. Mental-attentional capacity grows concurrently with prefrontal brain regions and is a fundamental factor that contributes to individual differences in cognitive abilities. We provide examples of a sophisticated method of meta-subjective task analysis that can serve as a tool for evaluating the mental demand of a task. Overall, the theory of constructive operators and its brain representations, its theory-based tasks, and the method of meta-subjective task analysis are useful tools for psychologists, educators, and neuroscientists who investigate aspects of development.

**Correspondence:** Marie Arsalidou, [marie.arsalidou@gmail.com](mailto:marie.arsalidou@gmail.com), 4/2 Armyansky ln., 101000 Moscow, Russia, School of Psychology, NRU HSE; Juan Pascual-Leone, [juanpl@yorku.ca](mailto:juanpl@yorku.ca); Janice M. Johnson, [janicej@yorku.ca](mailto:janicej@yorku.ca); Tatyana Kotova, [tkotova@gmail.com](mailto:tkotova@gmail.com)

**Keywords:** theory of constructive operators, operator, scheme, mental attention, capacity of mental attention, development of mental attention, cognitive development, metasubjective task analysis

**Copyright** © 2019. Marie Arsalidou, Juan Pascual-Leone, Janice M. Johnson, Tatyana Kotova. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original author is credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice.

**Acknowledgements.** We gratefully acknowledge support in part from the Russian Science Foundation #17-18-01047 (“Early detection of neurocognitive giftedness in children”).

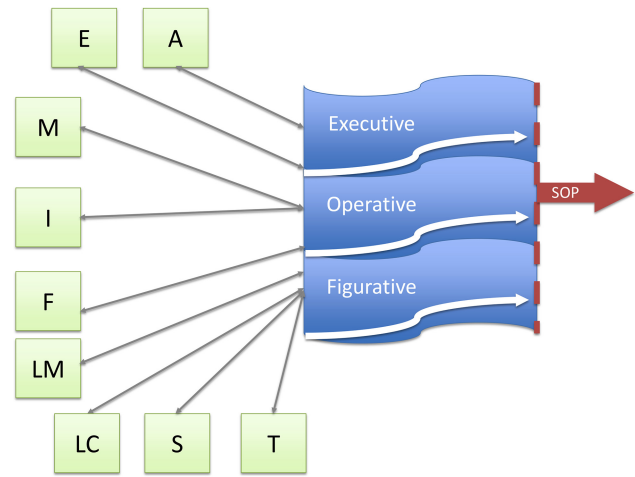
Received April 23, 2019, accepted June 27, 2019.

## Introduction

Numerous theories have been proposed to describe processes that underlie human cognitive function and intelligence (e.g., Ackerman, 1996; Anderson, Bothell, Lebiere, & Matessa, 1998; Das, Kirby, & Jarman, 1975). Many models focus specifically on the construct of working memory (Baddeley, 2000; Cowan, 2005; Ericsson & Kintsch, 1995), which refers to a system of processes in the working mind that temporarily store and manipulate information in the service of cognitive goals. The majority of models agree that working memory is of limited capacity, although few can account for the mechanism that brings about this limit. Cognitive limits are better explained by theories that follow a developmental perspective, which can account for the progression and advancement of cognitive performance as a function of age (e.g., Case, 1992; Demetriou & Spanoudis, 2018; Halford, Wilson, & Phillips, 1998; Halford, Cowan, & Andrews, 2007; Pascual-Leone, 1970). This paper focuses on a *dialectical-constructivist* (Pascual-Leone, 1987, 2014; Pascual-Leone & Johnson, 2005) *general theory of cognitive development* and its advantages for predicting and interpreting cognitive performance.

The Theory of Constructive Operators (TCO) was first conceived in the 1960s and the first paper stemming from it was a mathematical model for predicting Piaget's developmental stages (Pascual-Leone, 1970). The TCO is a general theory of development (Arsalidou, Pascual-Leone, & Johnson, 2010; Pascual-Leone, 1970, 1995, 1996, 2014; Pascual-Leone & Johnson, 2011; Pascual-Leone, Pascual-Leone, & Arsalidou, 2015). It was influenced by both Piaget's developmental constructivist theory and the theories of Vygotsky and Luria (Pascual-Leone, 1987, 1995, 1996, 2012, 2014; see also Miller, 2011), as well as neuropsychology/neuroscience. Central to our theory is the developmental construct of mental-attentional capacity. Mental-attention is related to Luria's (1973) functional system units 1 and 3, i.e., arousal and regulation of cortical activation tone. Explicating and combining Luria's and Piaget's ideas, we state that mental/endogenous attention is a limited-capacity brain resource that can serve to explain maturational changes in working memory (Pascual-Leone, 2000, 2019; Arsalidou et al., 2010). Based on current cognitive developmental (neoPiagetian) and neuroscientific evidence, we see unspecific arousal and automatic attention (Luria's, 1973, functional unit 1) as intertwined with, but differentiated from, intellectual/voluntary/mental (or endogenous) attention, which is a hidden specific regulation/resource operator expressed in the brain by prefrontal (excitatory or inhibitory) activity; and which is carried by prefrontal-basal-ganglia connections to the thalamus and is modulated by specific networks of slow neurotransmitters (e.g., dopamine). This mental endogenous attention is, we believe, related to and helps to explicate Luria's unit 3.

The capacity of mental attention is indexed by the number of items, not facilitated by the situation, that one can maintain and manipulate *in mind* (i.e., within the focal, most activated part of a *mental centration*). Organismically, these items are represented by *schemes* — information-bearing brain circuits. In addition to the schemes (*subjective operators*), the theory is framed in terms of *hidden* (not manifested in consciousness) organismic *operators* such



**Figure 1.** A simplified illustration of the Theory of Constructive Operators (TCO). Operators (in green: A = affective, E = executive, M = mental-attention, I = inhibition, F = Field factor, LM = learning using mental-attention, LC = learning using content, S = spatial, T = temporal); Schemes (in blue); and the principle of schematic over-determination of performance, or SOP (in red). Operator names and definitions are listed in Table 1.

as mental attention (i.e., content-free brain specific regulations or utilities) and organizing *principles* (general regulations, Pascual-Leone, 1969, 1970, 1995; Pascual-Leone & Johnson, 1991, 2005, 2011; see Figure 1). Operators are general-purpose and content-free specific regulations that can apply on schemes in any domain, monitored by the mediation of special executive-control schemes. Psychologically, schemes are self-propelling information-bearing units that can be classified into three groups: executives, operatives, and figuratives (see Figure 1).

Our principle of Schematic Overdetermination of Performance (SOP — Pascual-Leone & Johnson, 1991, 1999, 2005, 2011) expresses the spreading of activation in the brain, and can be seen as a generalization to the whole brain of the *final common path* of neuronal resolution *convergence* originally proposed by Sherrington for the motor networks (Sherrington, 1906; McFarland & Sibly, 1975). This SOP process serves to determine which schemes eventually apply at any moment to generate an outcome. This principle stipulates that any actual performance is the product of *all compatible activated schemes occurring at that time*, with as many schemes possibly converging to co-determine, beyond the pragmatic need (this is overdetermination), the performance in question. Sherrington seems to have shared already this generalized principle of convergence, because he writes: “Where it is a question of ‘mind’ the nervous system does not integrate itself by centralization upon one pontifical cell. Rather it elaborates a million-fold democracy whose each unit is a cell” (Sherrington, 1940, p. 277). Specifically, all activated and compatible schemes (because they are self-propelling — Piaget's assimilation function) will apply together to co-determine performance. Mutually incompatible schemes compete, and those more strongly activated eventually apply, while other dialectically-opposing schemes are inhibited and may not apply afterwards.

Within *misleading situations*, where many unwanted schemes are activated, this model of endogenous mental attention could be seen as intellectual/voluntary attention:

the working mind's spotlights, whose activation is brought about by task-relevant interacting general-purpose brain systems (hidden operators), local informational processes (schemes — subjective operators), and general regulations (organismic principles). Their dynamic synthesis generates thoughts and actions within a limited mental-attentional capacity symbolic organization. In *facilitating situations*, performance is easily determined by all activated schemes. However, in misleading situations mental-attentional capacity is needed to boost into dialectical dominance the task-relevant schemes, and so to synthesize the wanted performance. Mental-attentional capacity improves with age, and can be quantified within suitably misleading situations (Pascual-Leone, 1970; Pascual-Leone & Johnson, 2011).

*Metasubjective task analysis* can be used as a tool to interpret and predict the processing demands of a task situation (Arsalidou et al., 2010; Pascual-Leone & Johnson, 1991, 2005, 2011). We call our analytical method *Metasubjective Task Analysis* because it is done by adopting a perspective “from within” the person's own processes (Pascual-Leone, 2013; Pascual-Leone & Johnson, 2017). This technique helps to estimate the overall mental demand imposed by a task; it uses functional assumptions about the repertoire of schemes and the brain resources (operators and principles) of the person who attempts to solve a task. Operators, schemes, and principles, as well as the model of endogenous mental attention and task analysis, are discussed in more detail below.

## Operators, Schemes, and Overdetermination of Performance in the TCO

### Operators

*Operators* express content-free general resources of the brain's “hardware,” i.e., anatomical and functional-structural constraints providing *specific regulations*; given suitable executive competence, they can be used by the self as resource regulations in dynamic syntheses of intended performances (Pascual-Leone, 1970; Pascual-Leone & Johnson, 1991, 2005, 2011). Thus, TCO proposes operators (see Table 1) corresponding to specific regulations that explain the synthesis and emergence of novel performance. These operators are fully interpretable within the brain's functional dynamics or regulatory processes (Pascual-Leone & Johnson, 2005; Arsalidou & Pascual-Leone, 2016). Elimination of any one of the operators should elicit an observable deficit. Because organismic operators are not content-specific, their application by the individual's self (and their interpretation by theoreticians) is not constrained to domain-specific situations; this is a great advantage over other theories (e.g., Baddeley's [2000] Working Memory theory).

In the notation of the TCO, operators are symbolized by abbreviations of the general functions they represent (e.g., Pascual-Leone & Johnson, 1991, 2005, 2011). Table 1 presents in a theoretically-plausible evolutionary order the operators with their functional gist, and the brain regions likely to embody them (Arsalidou, 2003; Pascual-Leone, 1989; Pascual-Leone & Johnson, 1991, 2005). Operators and

their evolutionary order (ontogenetic and phylogenetic) are assumed to emerge in evolution, as do all biological characteristics, following an order of survival urgency coupled with complexity: the more urgent and less complex operators should appear first. In this sense, evolutionary order can be expected to unfold from birth or early development until later years in childhood and adolescence and then regress during aging. It begins with basic affective and biological needs, and proceeds to learning by acting in the environment and observing/internalizing recurrent invariances, to finally achieve organized (goal-directed) abstract problem-solving capabilities. The empirical rationale for this order draws on phylogenetic and ontogenetic evidence (Gogtay et al., 2004; Morgane, Galler, & Mokler, 2005; Rakic, 2009). For instance, we know that the limbic system, arising from midbrain structures and serving emotional and motivated activities, is a phylogenetically older brain system when compared to the neocortex arising from the forebrain (Morgane et al., 2005). Thus, an operator regulating affects should arise first. Similarly, operators that regulate a lower cognitive level, such as space (parietal) and time (temporal) perceptual activities, should emerge developmentally before the much higher mental (prefrontal) processes, as Leibniz and Kant in some sense claimed. Effortless flow-structuring regulation (*Time, T-operator*) and spatial structuring (*S-operator*) are preconditions for knowing (as Kant knew well), and they are directly mediated by the ventral (occipito-temporal) and dorsal (occipito-parietal) processing streams (for reviews, see Kastner & Ungerleider, 2000; Ungerleider & Haxby, 1994).

Ontogenetic brain growth has been studied by examining the maturation of gray matter from childhood to adulthood. It demonstrates that after the maturation of sensorimotor areas, parietal and temporal areas develop prior to the prefrontal cortex, whose development continues well into young adulthood (Gogtay et al., 2004). Our evolutionary interpretation of schemes is consistent with the idea of distinct functional-hierarchical systems within the cortex (i.e., levels of areas used by Luria, 1973, 1980 — primary, secondary, tertiary — relate to ways of processing complexity). Vygotsky's and Luria's ideas influenced the TCO (Pascual-Leone, 1987, 1996, 2014; Pascual-Leone, Johnson, Baskind, Dworsky, & Severtston, 2000). For instance, the TCO proposes different categories of schemes. Operative (executive schemes are a type of operative scheme) and figurative schemes are related respectively to frontal and posterior cortices. Such understanding of schemes was influenced by the brain organization proposed by Luria (1970). Critically, one way the TCO is unique in interpreting cognitive development is that it provides mechanisms that can explain the principles of praxis, modular organization, and dynamic synthesis of schemes, which involve both innate mechanisms and social-cultural learning (e.g., Pascual-Leone, 1996).

In a mature and efficient (i.e., adult) brain, operators and schemes engage with each other in an adaptable and flexibly hierarchical (often called *heterarchical*) manner. Simple situations (content) that do not require effortful mental activities may occur, and they are often coordinated by the sole means of *T-* and *S-*operators. The *T-operator* refers to the flowing and effortless temporal structuring of schemes' sequences; that is, temporal representations of

internalized episodic memory of invariant sequences. These “fluent” *T*-structures constitute sequential chunks that often can be spontaneously learned and repeated without intervention of the mental *M*-operator defined below. For instance, when reading a text message, to understand it we activate representations of its scheme sequences (word and phrase nested meanings) effortlessly, thanks to the *T*-operator. Similarly, the spatial *S*-operator constructively abstracts from perceptual-spatial schemes, thus effortlessly creating their relations of narrative coexistence (here-and-now interrelated patterns of co-activation). For example, we easily represent the layout of a home we visit and can recognize its design in a set of architectural outlines; likewise, we can contrast and compare a large airport with another smaller one, using spatial characteristics (configural designs, dimensions, etc.), without much mental-attentional effort.

More complex situations engage additional operators, some of them (the *M* and *I* operators) mentally effortful. Cognitive actions in *diverse* complex situations result from coordinated schemes boosted/inhibited or specifically regulated by operators that have appropriately different regulating characteristics. For instance, if we have some mathematical training, solving a mathematical integration problem would be a complex task for most of us. We need to plan the steps to follow for reaching a solution, and we must identify the parameters involved as we ignore distractors. To regulate/coordinate such a task, a changing set of dominant executive schemes (“the executive”), monitored by an *E*-operator, will be needed. This *E*-operator produces the effective executive-organizing power (within each situation) of the currently dominant and compatible activated executive schemes within the person’s repertoire. Executive schemes can be thought of as mental strategies activated when needed for the task. These executive controls (*control executives*) serve to regulate the functioning of other organismic operators (such as *M* and *I*), propitiating their application on action schemes to solve the task. Complementing the control executives, *task executives* are executive schemes that determine which actual *action schemes* to use in a given task, and the order of application.

Our next operator attempts to explain *mental* attention — mental in the sense that it is not just perceptual or automatic attention, but *effortful internal attention* (the mind’s work effort); it is an endogenous attention effortfully boosting activation of schemes relevant for the task. It boosts schemes (internal or external information) not facilitated by the situation that should be kept in mind or used in an action. According to Pascual-Leone (2019; Pascual-Leone & Johnson, 2005, 2011, in press), mental attention is best understood as a functional system constituted by four distinct hidden operators: *E* (executive — currently task-relevant executive schemes), *M* (mental-activation booster), *I* (mental-attentional inhibition), and *F* (the neoGestaltist field factor for simple syntheses — a minimization booster). These four operators in their interaction cause the emergence of mental attention. This form of attention has also been called endogenous, intellectual, voluntary, or executive attention. We prefer the term *mental* to executive attention, because executive processes first appear when the child is 12 months of age but mental/endogenous attention can in fact be recognized

in the baby at 3 or 4 months (Hendry, Jones, & Charman, 2016; Johnson, Posner, & Rothbart, 1991).

The mental-attentional *M*-operator, whose capacity would represent the individual’s mental attentional capacity, can effortfully boost activation of task relevant schemes that are not sufficiently activated by other means (e.g., *S*- or *T*- or *F*- or *A*-operators). This operator provides mental-attentional energy that can be used intentionally to boost schemes in problem solving. The *M*-operator is a limited-capacity resource that grows with age up to adolescence. Limitation in mental attention is often the reason complex multi-tasking is challenging, explaining in part why step-by-step approaches tend to facilitate problem solving. The attentional inhibition or *I*-operator (i.e., an interrupt function) causes effortful inhibition of irrelevant schemes. This inhibition operator is such an important constituent of mental attention that a leading team investigating both working memory and fluid intelligence has proposed that attentional inhibition processes (helping to disengage from outdated information) are the essential differential function of fluid intelligence (“higher fluid intelligence is indicative of self-initiated disengagement”; Shipstead, Harrison, & Engle, 2016, p. 779). They predicate this claim on the grounds that fluid intelligence is best measured using misleading problem-solving tasks that require truly novel solutions. In contrast, they argue, working memory, although much involved in disengagement, has “maintenance” as an essential function — that is, the activation boosting for relevant information. We understand these theoretical ideas to imply that mental attention is the preeminent (encompassing) *causal construct* for both fluid intelligence and working memory; indeed, mental attention differentiates and subsumes the activation booster of attention (*M*) and attentional inhibition/interruption (*I*). From this perspective, mental/executive attention could be understood as a superordinate causal determinant of both working memory maintenance and fluid intelligence/disengagement. Shipstead and colleagues (2016, p. 784) state: “the highest stratum is general ability (*g*) which we conceive of as similar to executive attention.” We basically agree with such a proposition, as well as with their claim that storage is not an essential function of working memory. Indeed, information storage of working memory is not a causal factor but a way to measure the activation-boosting capacity of mental attention (Pascual-Leone & Baillargeon, 1994; Pascual-Leone & Johnson, 2005, 2011).

The *F*-operator stands for the automatic “simplicity” organizational principle (a minimization booster) that spontaneously occurs in the dynamics of our *internal field of activation* (Berthoz, 2012; Rock, 1983). It corresponds to the processes of lateral inhibition as they occur in the cortex (Edelman, 1987). *F* corresponds to the *field* factor or *field effects* mentioned in psychology by neo-Gestaltists and by Piaget (often also called perceptual or representational closure, Minimum principle, Stimulus-Response compatibility, etc.). This field factor plays a role in the organization of content within mental attention by bringing *closure* (i.e., automatic simple structuring as an organized totality) to mental representations or actions, minimizing complexity while maximizing their adaptation to given external and internal constraints. As mentioned, our



**Table 1. Description of Operators and Their Corresponding Brain Regions in a Likely Evolutionary Order (After Arsalidou, 2003, and Pascual-Leone & Johnson, 2005)**

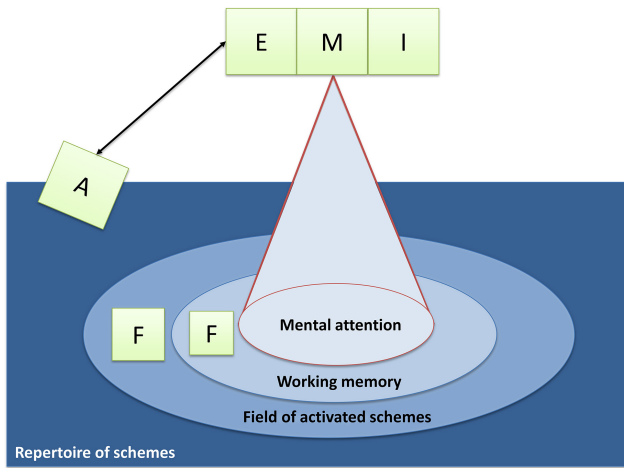
Operator	Description	Brain Region
A	Specific <b>affective</b> boosting or inhibition processes that intervene in motivation and attentive arousal.	Limbic lobes
C	Both the process of <b>content</b> learning and the schemes derived from associative content.	Primary and secondary association areas
F	The internal <b>field</b> operator together with the Schemes' Overdetermination Principle (SOP, see below), which act as brain's <i>binding mechanism</i> to bring closure to mental representations in a neo-Gestaltist manner.	All areas
LC	The process of automatized <b>logical-structural</b> learning reflectively abstracted from <b>content</b> learning (and other) through over-practice.	Right hemisphere
T	Effortlessly collates <b>time-flow sequences</b> of schemes, thus facilitating coordination of temporally-structured invariants that constitute distal objects (which emerge in agency and praxis).	Occipito-temporal
S	Facilitates emergence of <b>spatial</b> schemes by effortlessly coordinating <i>relations of coexistence</i> among activated schemes within the situation.	Occipito-parietal
B	<i>Self and psychosocial schemas</i> associated with the <b>being</b> of one's self.	Default mode network
I	The attentional <b>interrupt</b> : It produces the central <i>active inhibition</i> of unwanted schemes activated by the situation or the mind.	Prefrontal
M	Effortful <b>mental-attentional activation</b> of simple or complex (functional-system) schemes.	Prefrontal
LM	<b>Logical-structural</b> learning caused by effortful use of <b>mental-attentional</b> capacity.	Left hemisphere tertiary areas
E	<b>Executive</b> , i. e., dominant <i>set of activated executive schemes</i> in the person's repertoire that is useful for the task at hand.	Prefrontal

theory (TCO) explicates *mental attention* as the functional system of brain regulations coordinating the work of these four operators. Thus, *mental attention* =  $\langle E, M, I, F \rangle$  (Pascual-Leone & Johnson, 2005, 2011; see Figure 2). If any of these four operators is missing, the causal-overdetermination function of mental/executive/endogenous attention will not be explainable analytically, at least within the truly-novel problem-solving tasks that express fluid intelligence.

Another set of operators can apply on activated executive and action schemes to cause learning (Pascual-Leone & Goodman, 1979; Pascual-Leone & Johnson, in press). The content-learning booster, or *C-operator*, corresponds to simple associative learning via classical and/or operant conditioning, and is expressed by schemes derived from this sort of simple associative *content* learning. The logical or *L-operator* is a *logical-structural* learning booster that often coordinates content-experiential processes with more internal (memory-based) mental processes, abstracting the relations. We call this form of learning logical because it internalizes task-essential functional invariants that constitute the actual (empirically grounded) functional-relational infrastructure of the activity from which it has been learned or (in Piaget's sense) reflectively abstracted.

Specifically, the *LC-operator* refers to the automatized logical-structural learning that boosts the coordination of content learning via over-practice. The *LM-operator* refers to effortful logical-structural learning that results from the application of mental attention.

A critical operator in cognition is the (broadly defined) *affective A-operator*, which expresses the affective spontaneous boosting/inhibition of cognitive schemes that arousal of affects/emotions can provided in situations. In this paper, we subsume under *A* both basic affects and *personal-being*, affect-and-cognitive, psychosocial regulations that elsewhere Pascual-Leone has called *B-operator* (Pascual-Leone & Goodman, 1979; Pascual-Leone, Goodman, Ammon, & Subelman, 1978). These regulations include spontaneous self- or situation- or task-related affective-cognitive boosting (or inhibition) of schemes, as happens in spontaneous motivation and affectively driven attentive arousal elicited by situations. In psychological experiments, it is often a challenge to motivate participants, and motivation may affect the cognitive effort they use in a situation. For instance, a prize or an intrinsic motive (an affective goal) might affect motivation to engage in solving a complex integration problem. Similarly, how much we have eaten during a large dinner may change the boosting power



**Figure 2.** Model of endogenous mental attention.

This is a simplified model of endogenous mental attention showing the main operators, which include the *E*-, *M*-, *I*-, *F*- and *A*- operators and *SOP* depicted in red. Anatomical labels corresponding to each operator can be found in Table 1.

(*A*-operator) of our hunger, reducing the size of cake we choose for dessert afterwards.

## Schemes

Schemes are information bearers. They are dynamic and self-propelling psychological units (Pascual-Leone & Johnson, 1991, 2005, 2011), expressed in brain cell assemblies and networks (e.g., Arsalidou, Sharaev, Kotova, & Martynova, 2017; Sharaev, Zavyalova, Ushakov, Kartashov, & Velichkovsky, 2016). Schemes can be modified with experience and learning, and schemes that are applied more frequently may have a higher activation propensity (Piaget's assimilation) and a higher likelihood of being engaged in their specific (cue driven) sort of relevant situations. For instance, if you usually drive in Moscow, where the cars are configured for the right-hand side, and one day you find yourself driving in London, you may reach for the hand-break on the wrong side or drive on the wrong side of the road, because in London cars are configured to drive on the left-hand side.

Cognitive schemes (i.e., information-bearing units evaluated as true, false, or uncertain) appear under three distinct categories: figurative, operative, and executive (Pascual-Leone & Baillargeon, 1994; see Figure 1): (a) *figurative schemes* cause perceptions and representations of concepts or objects (e.g., an apple); (b) *operative schemes* express blueprints for actions and specific procedures applied on objects or concepts (e.g., eating the apple); and (c) *executive schemes*, a subdivision of operative schemes, embody general procedures (e.g., the plan to peel, cut, and eat an apple) and apply across content domains to regulate the specific function of other operators (e.g., *M*- or *I*- or *L*- or *A*-operator) as they apply to schemes to modify dynamism or change their degree of activation (e.g., Pascual-Leone & Johnson, 1991, 2005, 2011). Locally-adaptive functional hierarchies (called *heterarchies*) of schemes allow for dynamic interfaces that coordinate schemes of various complexities and are *context-sensitive* for meaning in distinct domains. For instance, for a child an apple may refer to a good snack or, if he or she is not hungry but playful, it may serve as a ball; for a university student the word apple

may refer to a fruit but more often to the brand of his or her computer. Similarly, a hammer may serve to drive in a nail, but it can also serve as a plumb if tied to the end of a cord.

## Principle of Schematic Overdetermination of Performance (*SOP*)

In solving a task, advanced mammals set an executive goal, which mobilizes various operators to activate and adapt relevant schemes and inhibit irrelevant ones. Effortful operators (such as *M* or *I*) are limited in the number of distinct schemes they can apply to, simultaneously, within misleading situations (Pascual-Leone, 2006). In a given situation, relevant schemes compete for activation. Some schemes prevail and eventually apply to produce a behavior or mental outcome; this behavior is synthesized by the *SOP* principle (Pascual-Leone & Johnson, 1991). This principle biases the competitive process of dynamic dominance among schemes (which include functional, behavioral or mental, *structures*; i.e., complex schemes often called *schemas*). Activated schemes co-determine, via *SOP*, the performance outcome. Note that executive schemes cannot change *SOP* but they can, by producing activation/inhibition of action schemes, change the *SOP* outcome. *SOP* works alongside the *F*-operator to integrate and provide closure, so that the most information-bearing and dominant (activated) schemes can apply in the simplest way. For instance, when completing the sentence: "I like to cut bread with a ...," a perhaps large set of schemes would be cued and activated; for most of us, the strongest scheme would likely be "knife," due to learned familiarity. Moreover, the strength of the scheme that is going to apply, often indexed in terms of reaction time, can be influenced by prior events. Priming studies show that prior events can positively or negatively influence subsequent choices (see Frings, Schneider, & Fox, 2015; Hutchinson, 2003, for reviews).

## Model of Endogenous Mental Attention

Endogenous mental attention (see Figure 2), the functional system of four operators (*E*, *M*, *I*, *F*), is a complex dynamic process by which organismic operators and schemes are brought together as a working system to produce cognitive outcomes or actions. This model could also be seen by working memory theorists as an organized nesting of psychological constructs; a functional nesting in which mental attention lies within working memory, and working memory lies within the field of activated schemes, which in turn lies within the repertoire of schemes or long-term memory (e.g., Pascual-Leone & Johnson, 1991, 2005, 2011). The *E*-operator acts to appoint and coordinate schemes for the task; it uses *M*- and *I*-operators to suitably regulate the schemes' degree of activation. The *SOP*, together with the *F*-operator, acts at every embedded level, as shown in Figure 2, to determine which schemes eventually will apply.

The *M*-operator is a limited, general-purpose resource, whose highest quantified value, its *capacity*, is the maximum number of distinct schemes on which the *M*-operator can simultaneously apply in an act of mental attention. According to the TCO, *M*-capacity during the *symbolic* mental-processing period (i.e., in and after 3 years of chronological age in ordinary children) grows on

average by one symbolic unit every two years, reaching an average of seven units in 15 to 16 year olds, matching the capacity of adults (see Table 2; Pascual-Leone, 1970, 2012, 2019; Pascual-Leone & Johnson, 2005, 2011). This growth function has been supported by extensive research (e.g., Agostino, Johnson, & Pascual-Leone, 2010; Arsalidou et al., 2010; Arsalidou & Im-Bolter, 2016; Bereiter & Scardamalia, 1979; Im-Bolter, Johnson, & Pascual-Leone, 2006; Johnstone & El-Banna, 1986; Johnson, Im-Bolter, & Pascual-Leone, 2003; Lawson, 1983; Morra, 2001; Morra, Parella, & Camba, 2011; Morra, Camba, Calvini, & Bracco, 2013; Pascual-Leone, 1970; Pascual-Leone & Baillargeon, 1994; Pascual-Leone & Johnson, 2005, 2011; Pennings & Hessels, 1996; Powell, Arsalidou, Vogan, & Taylor, 2014). Our estimate of seven units as the maximal *M*-capacity for adults is contradictory to that of some current theories, which interpret the maturational mental-attentional capacity (the maximal capacity, not just what is usually employed) as 4 or 5 units in adults (e.g., Cowan, 2001; Cowan, Ricker, Clark, Hinrichs, & Glass, 2015; Halford et al., 2007). However, their developmental prediction lacks support from reviews of behavioral data of children between the ages of 5 to 12 years (e.g., Arsalidou, 2013; Pascual-Leone & Johnson, 2011; Simmering & Perone, 2013) and contradicts analyses of Piaget's formal-operational logic tasks (Pascual-Leone, Escobar, & Jonson, 2012).

Age-appropriate performance can be measured by using tasks scaled in their *M*-demand. *M*-demand is the minimal number of distinct schemes that participants must simultaneously activate in order to succeed in a task. Suitable scaling of difficulty level in tasks can be achieved using theory-guided metasubjective (i.e., mental or "from within") task analysis, which yields measures of *M*-capacity (Pascual-Leone, 1970, 1987; Pascual-Leone & Baillargeon, 1994; Pascual-Leone & Johnson, 1991, 2005, 2011). In children, *M*-capacity normally increases with chronological age up to adolescence. For example, a task with a symbolic-processing *M*-demand of four should be successfully completed by children who are 9-10 years old or older (i.e., who have an *M*-capacity of

at least four symbolic schemes; see Table 2). Tasks measuring *M*-capacity are called *M*-measures, and metasubjective task analysis can be used to estimate their *M*-demand.

## Facilitating and Misleading Situations

An important distinction in the TCO refers to facilitating and misleading situations. Identifying the degree of facilitation or misleadingness can reveal which operators are going to apply. Consider a continuum, where on one end there are simple situations with clear solutions, and on the other end are complex situations with obscured solutions that must be extracted effortfully. These are respectively called facilitating versus misleading situations (Pascual-Leone, 1970, 1980, 1989). Specifically, a situation is *misleading* when it increases processing demand due to salient, irrelevant features (or processes) that activate schemes inducing individuals to error, relative to the intended task performance (Pascual-Leone, 1989; Pascual-Leone & Johnson, 2005).

Misleading situations often contain interfering integral features or elicit competing executive plans that require dimensional separation (using effortful processing) to achieve the intended performance (Pascual-Leone & Baillargeon, 1994). Integral (or *embedding*) features are features of the situation that, due to perceptual (e.g., gestalt principles) and learning processes, appear jointly integrated into a single salient object, aspect, or pattern of the situation. This can occur when we are searching for a figure in an "embedding context" (Witkin 1949; Witkin & Goodenough, 1981). In Witkin's Embedded Figures Task (Witkin, 1950) there is a figure to be found (e.g., a triangle) embedded into the complex patterning of the item's total figural compound. The figure to be found is embedded because each of its parts (e.g., each of the three sides of the triangle) belongs within the total compound to three distinctly different objects or parts of the compound.

Another type of misleading situation is found in the Stroop task (Stroop, 1935), where we need to avoid the automatism of reading color words and apply our attention to the ink color, naming the colors instead of reading the color words (Arsalidou, Pascual-Leone, Morris, Johnson, & Taylor, 2013). The Stroop task is well known as a measure of inhibition (see MacLeod, 1991, for a review) which is needed because reading is automatic and literate people must inhibit reading in order to attend and respond to the incongruent ink color. Indeed, in order to focus on relevant schemes in misleading situations, we must actively inhibit perceptually salient or automatized distractors, whether the distractors are irrelevant features (e.g., surrounding drawing lines in the embedded figures test) or irrelevant actions (e.g., automatism of reading color words in the Stroop task).

Moreover, competing executive plans can also create misleading situations. This is often evident when we try to multitask and do many things at once. Dual-task paradigms (see Daneman & Carpenter, 1980; Engle, 2001) were designed to do just that. During dual tasks an individual is asked to perform two tasks simultaneously, such as reading sentences and keeping track of numbers. Interference between goals from the two tasks produces a misleading executive context (Cowan & Morey, 2007).

**Table 2.** Predicted Maximal Mental-Attentional Capacity, as a Function of Chronological Age after 3 Years (Symbolic Processing)

Chronological Age	<i>M</i> -capacity = $e+k$
3–4 years	$e+1$
5–6 years	$e+2$
7–8 years	$e+3$
9–10 years	$e+4$
11–12 years	$e+5$
13–14 years	$e+6$
15+ years	$e+7$

**Note:** *M*-capacity is represented as  $e+k$ ;  $e$  represents the sensorimotor *M*-capacity developed before 3 years of age (for sensorimotor processing). This  $e$  portion of *M*-capacity serves to hold the *general executive* schemes active during symbolic tasks;  $k$  represents the number of mental-symbolic, non-executive *action schemes* that can be simultaneously boosted or "held in mind" during task solution.

In contrast to misleading situations, facilitating situations contain mainly task-relevant schemes that meet the needs for solving the task (Pascual-Leone & Johnson, 1991, 2005, 2011). A facilitating situation occurs when no distractors are present or when their correction is overlearned. For instance, pro-saccade tasks may be viewed as a typical facilitating situation used in experiments. During pro-saccade tasks, participants are asked to make an eye movement (i. e., saccade) in the direction of a salient visual target. Contrarily, in anti-saccade tasks participants are asked to *refrain* from making an eye-movement towards a visual cue (a strong tendency driven by an automatic/prewired orienting reflex) and instead to make intentional eye-movements in the opposite direction (i. e., when a visual cue appears on the right, participants must look to the left; Hallett, 1978). The latter situation contains a strong misleading component (the automatic tendency to look at the cue), which must be intentionally suppressed/inhibited. Indeed, meta-analyses of neuroimaging data show, in addition to activity in frontal eye-fields, how parietal cortices (*S*-operator in terms of the TCO) are responsible for saccades (Jamadar, Fielding, & Egan, 2013). In contrast, anti-saccades additionally engage prefrontal cortices — a brain region linked to *executive schemes* that control attentional activation and inhibition — associated with intentional-effortful cognitive control (the *E*-, *M*-, and *I*-operators in our theory).

The TCO, a general theory of cognitive development can be useful to psychologists, neuroscientists, and educators. Some suggest that frameworks that explicate complex cognition can provide useful suggestions for computational models and algorithm design (Schmid et al., 2011). Let us briefly comment: TCO is a model with specific mental regulations (hidden operators) and general regulations used by everyone in their working mind, including computer task designers, programmers and users when programming a task solution or using these models. Our methods might not help in finding the best program for a given task strategy, but given one such strategy they could estimate the mental difficulty of inventing (by a designer programmer) or comprehending (by a program user) the task strategy of given programs. The TCO methods could also provide heuristic ideas about how to design (or teach) one program strategy, given a certain task. Our constructs of *misleading* and *facilitating situations*, with their theoretical explanations, might provide ways for developing algorithmic model classifiers of effective complexity in programs (from both perspectives — programming and using the programs). Furthermore, the capacity limits posed in our theory by mental attention (and particularly the *M*-operator) can help to evaluate difficulty for users of the computer programs as models and in implementations.

Complex psychological phenomena, such as recursive thinking (e. g., van den Bos, Rooij, Sumter, & Westenberg, 2016) may also benefit from a TCO interpretation. Recursive thinking is a complex human activity related to language, math, problem solving, social cognition, theory of mind, etc. Any complex temporal process may need recursion for its learning or modeling. The ability to consider mental states of others and to evaluate multiple perspectives improves throughout childhood and

adolescence (e. g., van den Bos et al., 2016; Im-Bolter et al., 2016). Van den Bos et al. (2016) showed that performance on recursive thinking tasks increases with age; verbal abilities only partially explain this improvement, because the flow of non-verbal mentation (time-constrained mind working) is also involved. A similar conclusion was reached by Im-Bolter et al. (2016) who reveal that “theory of mind” psycho-social reasoning depends greatly on the maturity level of the *M*- and *I*- operators formulated by the TCO perspective.

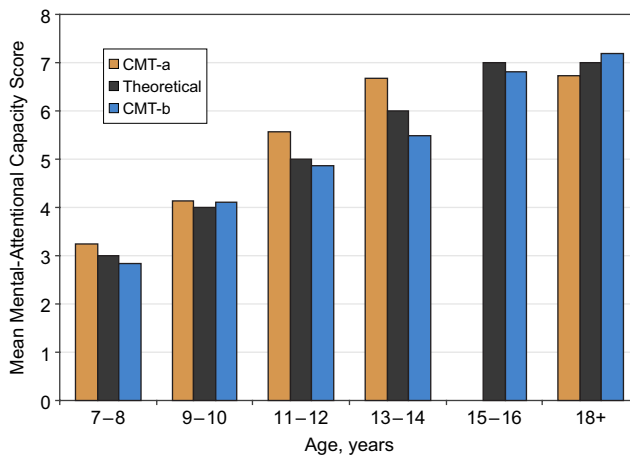
Recall that facilitation and misleadingness occur in a dynamically-graded continuum (i. e., a situation can be more facilitating or more misleading), which considerably changes the organismic operators needed to solve the task. Indeed, all things equal, successful completion of misleading tasks demands much more *E*-, *M*-, and *I*-capacity than facilitating tasks. How then to determine whether a task is misleading or facilitating? To identify these features and processes, we need to do a mental-process (metasubjective) task analysis.

## Metasubjective Task Analysis (MTA)

This is a theory-guided, rationally-based approach used to estimate the *M*-demand of a task. As mentioned, it is called metasubjective because it attempts to describe task-solution processes “from within”; that is, from the perspective of the person’s processes themselves. The theory of constructive operators provides constructs and tools to break down a task to its basic process components (schemes and organismic functions; i. e., operators and principles) that influence the task’s *E*-, *M*-, *I*-, and other demands (Pascual-Leone & Johnson, 1991, 2005, 2011, in press). In other words, this analysis can be used to identify an appropriate strategy for the task, and to model operative schemes (including their parameters), figurative schemes, and corresponding operators likely to intervene in the solving process. This method is particularly valuable when designing new measures for estimating/assessing individuals’ performance capabilities, such as in children and in clinical populations. For instance, to know that a symbolic-processing task requires effortful coordination of one operative and three figurative schemes leads us to expect the symbolic *M*-demand of this task to be *at most* four units (if there is no other complicating, distracting, or misleading factors). In making the prediction, we can then anticipate that this task would be easily accessible to ordinary adults, whose functional (i. e., commonly used) *M*-capacity tends to be 4 or 5, but whose structural (maximal) *M*-reserve is 7 units (Pascual-Leone, 1970, 2012, 2019; Pascual-Leone & Johnson, 2005, 2011). In contrast, children younger than nine years old can be expected to have difficulty in successfully solving such a task, unless facilitating factors exist, due to experience or situational characteristics.

We illustrate this MTA with a developmental task, the Color Matching Task (CMT; Arsalidou et al., 2010). We focus here on the Clown version. In this task participants see, one by one, a series of items (always a clown); for each one, they must indicate whether relevant features (i. e., colors) of the current item match those of the immediately preceding item. In other words, participants





**Figure 3.** Empirical average of mental-attentional capacity scores from Clown version of CMT. The black column exhibits theoretically predicted values for  $M$ -capacity for each developmental level (Pascual-Leone, 1970). Empirical scores were reported in two different studies, CMT-a (Arsalidou et al., 2010) and CMT-b (Powell et al., 2014).

respond to whether *the relevant set* of colors is the same or different in contiguous items. The colors blue and green are always irrelevant, and relevant colors vary in number from one to six, depending on the item's difficulty level. Therefore, we have one operation (the operative scheme to *scan and identify*) that is applied to the relevant colors (figurative schemes) that range across items from one to six. In addition to irrelevant colors, participants need to ignore color location, as well as the face of the clown and the integral compound figure of the clown itself with its body parts (i.e., gloves, buttons, collar, etc.). These distracting/misleading factors are critical to estimate the task's  $M$ -demand, because misleading schemes (or features) force participants to adopt bypassing (error-avoiding) strategies that usually involve a higher number of relevant schemes — a higher  $M$ -demand. In the present task, to Scan-Identify-Match the sets of colors becomes more complex: an additional scheme is required to effortfully extract, at every turn, *one relevant target color from the clown's current item* (its total set of color features, some of which are misleading or irrelevant) to be matched with *the previous item's set of  $n$  (relevant) criterion colors*. If we want to quantify the  $M$ -demand for an item with  $n$  relevant colors, the estimate should be  $n + 2$  operative schemes, where 2 stands for the Scan-Identify-Match operative *plus* the scheme for extracting new target-colors from the clown figure in the current item in question. For instance, a task with two relevant colors will have an  $M$ -demand of four units. Since we know that children of 9-10 years have a symbol-processing  $M$ -capacity of four (see Table 2), they should be able to pass this level of task difficulty, but younger children should fail. Children are assigned an  $M$ -capacity score corresponding to the  $M$ -demand of the highest item level they can pass reliably.

As illustrated in Figure 3, data from two empirical cross-sectional studies exhibit close correspondence between children's obtained CMT  $M$ -scores and the predicted theoretical  $M$ -capacity based on age, over the whole developmental range (Arsalidou et al., 2010; Powell et al., 2014; see Figure 3). These empirical results (along

with many different results across age-group samples and across tasks — some were referenced above) offer strong construct validity to this constructivist-developmental modeling which was first proposed over forty years ago (Pascual-Leone, 1970; Pascual-Leone & Baillargeon, 1994; Pascual-Leone & Johnson, 2005, 2011). The similarity of the obtained *quantitative scores across types of tasks* and across age-group samples speaks to the developmental reliability and *construct validity* of this  $M$ -measurement method (a method that is remarkably culture fair; Arsalidou & Im-Bolter, 2016; Miller, Pascual-Leone, Campbell, & Jukes, 1989; Miller, Pascual-Leone, & Andrew, 1992; Pascual-Leone et al., 2000).

## Conclusion

We have summarized very briefly the fundamental constructs, models, and quantitative predictions of the Theory of Constructive Operators and given experimental and everyday examples as simple illustrations. Originally inspired by the work of Piaget and by Goldstein's (2000/1934) and Luria's neuropsychology (among others), our distinct contribution has been to clarify, by way of constructivist developmental research, the intertwining of Luria's modes of processing — his Unit 1 for regulating tone and the waking and mental states of arousal, vigilance, and attentional inhibition with his Unit 3 for programming, regulating, and verification of activity (operative and executive processes). We clarified their intertwining by explicating concepts, in particular schemes and hidden operators, with a focus on mental attention. *Mental attention was formulated* (but not causally explained) by William James and Luria as *voluntary/intellectual attention, which we have quantified via developmental complexity analysis of many age-group samples*. We have also intimated how, in some sense, mental-attention relates to consciousness and intelligence.

We highlight three other critical benefits that this theory offers.

First, *a distinction is made, and the coordination predicated, between (hidden) organismic operators* (specific regulations fully interpretable within the brain's functional dynamics or regulatory processes — an issue beyond the paper's scope) *and the information-bearing schemes* (information carriers, brain cell assemblies and information networks). Notice that the content-free and specific-regulation function of the hidden operators allow us to apply this modeling to explain context-sensitive functioning of schemes in many distinct content domains. This is critical, because mental-attention is a cognitive resource implicated in all sorts of problem-solving across domains and across age groups (see Arsalidou & Im-Bolter, 2016; Onwumere & Reid, 2008, for reviews).

Second, there are now well-established quantitative predictions (first introduced by Pascual-Leone in 1970) about the *mental-attentional capacity* characteristic of Piagetian and neoPiagetian developmental stages. *This permits, via metasubjective analysis, quantitative performance predictions across many tasks, for children of different ages*. These expectations have been and can be tested developmentally.

Third, a methodology now exists for *identifying a-priori the effective developmental complexity*, or mental (M-) demand, of most cognitive tasks or items; this allows for rigorous age-appropriate performance predictions.

## References

- Ackerman, P.L. (1996). A theory of adult intellectual development: Process, personality, interests, and knowledge. *Intelligence*, 22(2), 227–257. doi:10.1016/s0160-2896(96)90016-1
- Agostino, A., Johnson, J., & Pascual-Leone, J. (2010). Executive functions underlying multiplicative reasoning: Problem type matters. *Journal of Experimental Child Psychology*, 105(4), 286–305. doi:10.1016/j.jecp.2009.09.006
- Anderson, J.R., Bothell, D., Lebiere, C., & Matessa, M. (1998). An integrated theory of list memory. *Journal of Memory and Language*, 38(4), 341–380. doi:10.1006/jmla.1997.2553
- Arsalidou, M. (2003). *Neural processes of visual problem solving and complexity*. Unpublished master's thesis. York University.
- Arsalidou, M. (2013). Working memory capacity: The need for process task-analysis. *Frontiers in Psychology*, 4, 257:1–2. doi:10.3389/fpsyg.2013.00257
- Arsalidou, M., & Im-Bolter, N. (2016). Why parametric measures are critical for understanding typical and atypical cognitive development. *Brain Imaging and Behavior*, 11(4), 1214–1224. doi:10.1007/s11682-016-9592-8
- Arsalidou, M., & Pascual-Leone, J. (2016). Constructivist developmental theory is needed in developmental neuroscience. *npj Science of Learning*, 1(1)doi:10.1038/npjscilearn.2016.16
- Arsalidou, M., Pascual-Leone, J., & Johnson, J. (2010). Misleading cues improve developmental assessment of working memory capacity: The color matching tasks. *Cognitive Development*, 25(3), 262–277. doi:10.1016/j.cogdev.2010.07.001
- Arsalidou, M., Pascual-Leone, J., Johnson, J., Morris, D., & Taylor, M.J. (2013). A balancing act of the brain: Activations and deactivations driven by cognitive load. *Brain and Behavior*, 3(3), 273–285. doi:10.1002/brb3.128
- Arsalidou, M., Sharaev, M.G., Kotova, T., & Martynova, O. (2017). Commentary: Selective development of anticorrelated networks in the intrinsic functional organization of the human brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 13:1–3. doi:10.3389/fnhum.2017.00013
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417–423. doi:10.1016/s1364-6613(00)01538-2
- Bereiter, C., & Scardamalia, M. (1979). Pascual-Leone's *M* Construct as a link between cognitive-developmental and psychometric concepts of intelligence. *Intelligence*, 3(1), 41–63. doi:10.1016/0160-2896(79)80005-7
- Berthoz, A. (2012). *Simplexity: Simplifying principles for a complex world* (G. Weiss, Trans.). New Haven: Yale University Press.
- Case, R. (1992). The role of the frontal lobes in the regulation of cognitive development. *Brain and Cognition*, 20(1), 51–73. doi:10.1016/0278-2626(92)90061-p
- Cowan, N. (2001). Metatheory of storage capacity limits. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 154–176. doi:10.1017/s0140525x0161392x
- Cowan, N. (2005). *Working memory capacity (Essays in cognitive psychology)*. New York: Psychology Press.
- Cowan, N., & Morey, C.C. (2007). How can dual-task working memory retention limits be investigated? *Psychological Science*, 18(8), 686–688. doi:10.1111/j.1467-9280.2007.01960.x
- Cowan, N., Ricker, T.J., Clark, K.M., Hinrichs, G.A., & Glass, B.A. (2015). Knowledge cannot explain the developmental growth of working memory capacity. *Developmental Science*, 18(1), 132–145. doi:10.1111/desc.12197
- Daneman, M., & Carpenter, P.A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19(4), 450–466. doi:10.1016/S0022-5371(80)90312-6
- Das, J.P., Kirby, J., & Jarman, R.F. (1975). Simultaneous and successive synthesis: An alternative model for cognitive abilities. *Psychological Bulletin*, 82(1), 87–103. doi:10.1037/h0076163
- Demetriou, A., & Spanoudis, G. (2018). *Growing minds: A developmental theory of intelligence, brain, and education*. N.Y.: Routledge.
- Edelman, G.M. (1987). *Neural Darwinism. The theory of neural group selection*. New York: Basic Books.
- Engle, R.W. (2001). What is working memory capacity? In H.L. Roediger, J.S. Nairne, I. Neath, & A.M. Surprenant (Eds.), *The nature of remembering: Essays in honor of Robert G. Crowder*. (pp. 297–314). Washington: American Psychological Association. doi:10.1037/10394-016
- Ericsson, K.A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, 102(2), 211–245. doi:10.1037/0033-295x.102.2.211
- Frings, C., Schneider, K.K., & Fox, E. (2015). The negative priming paradigm: An update and implications for selective attention. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22(6), 1577–1597. doi:10.3758/s13423-015-0841-4
- Gogtay, N., Giedd, J.N., Lusk, L., Hayashi, K.M., Greenstein, D., Vaituzis, A.C., Nugent, T.F., Herman, D.H., Clasen, L.S., Toga, A.W., Rapoport, J.L., & Thompson, P.M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(21), 8174–8179. doi:10.1073/pnas.0402680101
- Goldstein, K. (2000). *The organism*. New York, NY: Zone Books. (Original work published 1934).
- Halford, G.S., Cowan, N., & Andrews, G. (2007). Separating cognitive capacity from knowledge: A new hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(6), 236–242. doi:10.1016/j.tics.2007.04.001
- Halford, G.S., Wilson, W.H., & Phillips, S. (1998). Processing capacity defined by relational complexity: Implications for comparative, developmental, and cognitive psychology. *Behavioral and Brain Sciences*, 21(6), 803–831. doi:10.1017/s0140525x98001769
- Hallett, P.E. (1978). Primary and secondary saccades to goals defined by instructions. *Vision Research*, 18(10), 1279–1296. doi:10.1016/0042-6989(78)90218-3
- Hendry, A., Jones, E.J.H., & Charman, T. (2016). Executive function in the first three years of life: Precursors, predictors and patterns. *Developmental Review*, 42, 1–33. doi:10.1016/j.dr.2016.06.005
- Hutchison, K.A. (2003). Is semantic priming due to association strength or feature overlap? A microanalytic review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 10(4), 785–813. doi:10.3758/bf03196544
- Im-Bolter, N., Agostino, A., & Owens-Jaffray, K. (2016). Theory of mind in middle childhood and early adolescence: Different from before? *Journal of Experimental Child Psychology*, 149, 98–115. doi:10.1016/j.jecp.2015.12.006
- Im-Bolter, N., Johnson, J., & Pascual-Leone, J. (2006). Processing limitations in children with specific language impairment: The role of executive function. *Child Development*, 77(6), 1822–1841. doi:10.1111/j.1467-8624.2006.00976.x
- Jamadar, S.D., Fielding, J., & Egan, G.F. (2013). Quantitative meta-analysis of fMRI and PET studies reveals consistent activation in fronto-striatal-parietal regions and cerebellum during antisaccades and prosaccades. *Frontiers in Psychology*, 4, 749:1–15. doi:10.3389/fpsyg.2013.00749
- Johnson, J., Im-Bolter, N., & Pascual-Leone, J. (2003). Development of mental attention in gifted and mainstream children: The role of mental capacity, inhibition, and speed of processing. *Child Development*, 74(6), 1594–1614. doi:10.1046/j.1467-8624.2003.00626.x
- Johnson, M.H., Posner, M.I., & Rothbart, M.K. (1991). Components of visual orienting in early infancy: Contingency learning, anticipatory looking, and disengaging. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3(4), 335–344. doi:10.1162/jocn.1991.3.4.335
- Johnstone, A.H., & El-Banna, H. (1989). Understanding learning difficulties—A predictive research model. *Studies in Higher Education*, 14(2), 159–168. doi:10.1080/03075078912331377486

- Kastner, S., & Ungerleider, L. G. (2000). Mechanisms of visual attention in the human cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 23(1), 315–341. doi:10.1146/annurev.neuro.23.1.315
- Lawson, A. E. (1983). Predicting science achievement: The role of developmental level, disembedding ability, mental capacity, prior knowledge, and beliefs. *Journal of Research in Science Teaching*, 20(2), 117–129. doi:10.1002/tea.3660200204
- Luria, A. R. (1970). The functional organization of the brain. *Scientific American*, 222(3), 66–79.
- Luria, A. R. (1973). *The working brain. An introduction to neuropsychology*. London: Penguin Books.
- Luria, A. R. (1980). Disturbances of higher cortical functions with lesions of the frontal region. In *Higher cortical functions in man* (pp. 246–365). Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4615-8579-4\_8
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, 109(2), 163–203. doi:10.1037/0033-2909.109.2.163
- McFarland, D. J., & Sibly, R. M. (1975). The behavioural final common path. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270(907), 265–293. doi:10.1098/rstb.1975.0009
- Miller, R. (2011). *Vygotsky in perspective*. Cambridge University Press.
- Miller, R., Pascual-Leone, J., & Andrew, D. J. (1992). Cognitive executive processes and mental capacity on the compound stimulus visual information task in a group of Zulu-speaking children. *South African Journal of Psychology*, 22(1), 1–9. doi:10.1177/008124639202200101
- Miller, R., Pascual-Leone, J., Campbell, C., & Jukes, T. (1989). Cross-cultural similarities and differences on two neo-Piagetian cognitive tasks. *International Journal of Psychology*, 24(1–5), 293–313. doi:10.1080/00207594.1989.10600049
- Morgane, P., Galler, J., & Mokler, D. (2005). A review of systems and networks of the limbic forebrain/limbic midbrain. *Progress in Neurobiology*, 75(2), 143–160. doi:10.1016/j.pneurobio.2005.01.001
- Morra, S. (2001). On the information-processing demands of spatial reasoning. *Thinking & Reasoning*, 7(4), 347–365. doi:10.1080/13546780143000116
- Morra, S., Camba, R., Calvini, G., & Bracco, F. (2013). Italians do it better? M-capacity measurement and cross-linguistic differences in the Direction Following Task (DFT). *Journal of Applied Psycholinguistics*, 13(1), 9–24.
- Morra, S., Parrella, I., & Camba, R. (2011). The role of working memory in the development of emotion comprehension. *British Journal of Developmental Psychology*, 29(4), 744–764. doi:10.1348/2044-835x.002006
- Onwumere, O., & Reid, N. (2014). Field dependency and performance in mathematics. *European Journal of Educational Research*, 3(1), 43–57. doi:10.12973/eu-jer.3.1.43
- Pascual-Leone, J. (1969). *Cognitive development and cognitive style: A general psychological integration*. Unpublished doctoral dissertation. University of Geneva.
- Pascual-Leone, J. (1970). A mathematical model for the transition rule in Piaget's developmental stages. *Acta Psychologica*, 32, 301–345. doi:10.1016/0001-6918(70)90108-3
- Pascual-Leone, J. (1980). Constructive problems for constructive theories: The current relevance of Piaget's work and a critique of information-processing simulation psychology. In R. H. Kluwe, & H. Spada (Eds.), *Developmental models of thinking* (pp. 263–296). New York: Academic Press.
- Pascual-Leone, J. (1987). Organismic processes for neo-Piagetian theories: A dialectical causal account of cognitive development. *International Journal of Psychology*, 22(5–6), 531–570. doi:10.1080/00207598708246795
- Pascual-Leone, J. (1989). An organismic process model of Witkin's field-dependence—independence. In *Cognitive style and cognitive development* (pp. 36–70). Westport, CT, US: Ablex Publishing.
- Pascual-Leone, J. (1995). Learning and development as dialectical factors in cognitive growth. *Human Development*, 38(6), 338–348. doi:10.1159/000278340
- Pascual-Leone, J. (1996). Vygotsky, Piaget, and the problem of Plato. *Swiss Journal of Psychology / Schweizerische Zeitschrift für Psychologie / Revue Suisse de Psychologie*, 55(2–3), 84–92.
- Pascual-Leone, J. (2000). Reflections on working memory: Are the two models complementary? *Journal of Experimental Child Psychology*, 77(2), 138–154. doi:10.1006/jecp.2000.2593
- Pascual-Leone, J. (2006). Mental attention, not language, may explain evolutionary growth of human intelligence and brain size. *Behavioral and Brain Sciences*, 29(1), 19–20. doi:10.1017/s0140525x06299011
- Pascual-Leone, J. (2012). Piaget as a pioneer of dialectical constructivism: Seeking dynamic processes for human science. In E. Marti, & C. Rodriguez (Eds.), *After Piaget* (pp. 15–41). New Jersey: Transaction Publishers.
- Pascual-Leone, J. (2013). Can we model organismic causes of working memory, efficiency and fluid intelligence? A meta-subjective perspective. *Intelligence*, 41(5), 738–743. doi:10.1016/j.intell.2013.06.001
- Pascual-Leone, J. (2014). Dialectics. In T. Teo (Ed.), *Encyclopedia of critical psychology* (pp. 421–428). Springer New York.
- Pascual-Leone, J. (2019). Growing minds have a maturing mental attention: A review of Demetriou and Spanoudis (2018). *Intelligence*, 72, 59–66. doi:10.1016/j.intell.2018.12.001
- Pascual-Leone, J., & Baillargeon, R. (1994). Developmental measurement of mental attention. *International Journal of Behavioral Development*, 17(1), 161–200. doi:10.1177/016502549401700110
- Pascual-Leone, J., Escobar, E. M. R., & Johnson, J. (2012). Logic: Development of logical operations. In *Encyclopedia of human behavior* (pp. 538–549). New York, NY: Elsevier. doi:10.1016/b978-0-12-375000-6.00223-8
- Pascual-Leone, J., & Goodman, D. (1979). Intelligence and experience: A neopiagetian approach. *Instructional Science*, 8(4), 301–367.
- Pascual-Leone, J., Goodman, D., Ammon, P., & Subelman, I. (1978). Piagetian theory and neo-Piagetian analysis as psychological guides in education. In *Knowledge and development* (pp. 243–289). New York: Plenum Press. doi:10.1007/978-1-4684-3402-6\_8
- Pascual-Leone, J., & Johnson, J. (1991). The psychological unit and its role in task analysis: A reinterpretation of object permanence. In M. Chandler, & M. Chapman (Eds.), *Criteria for competence: Controversies in the conceptualization and assessment of children's abilities* (pp. 153–187). Hillsdale, NJ: Erlbaum. doi:10.4324/9780203772102
- Pascual-Leone, J., & Johnson, J. (1999). A dialectical constructivist view of representation: Role of mental attention, executives, and symbols. In I. E. Sigel (Ed.), *Development of mental representation: Theories and applications* (pp. 169–200). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Pascual-Leone, J., & Johnson, J. (2005). A dialectical constructivist view of developmental intelligence. In *Handbook of understanding and measuring intelligence* (pp. 177–201). Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Inc. doi:10.4135/9781452233529.n11
- Pascual-Leone, J., & Johnson, J. (2011). A developmental theory of mental attention: Its application to measurement and task analysis. In *Cognitive development and working memory: A dialogue between neo-Piagetian theories and cognitive approaches* (pp. 13–46). New York, NY: Psychology Press.
- Pascual-Leone, J., & Johnson, J. (2017). Organismic-causal models “from within” clarify developmental change and stages. In N. Budwig, E. Turiel, & P. D. Zelazo (Eds.), *New perspectives on human development* (pp. 67–87). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/cbo9781316282755.006
- Pascual-Leone, J., & Johnson, J. M. (in press). *The working mind: Meaning and mental attention in human development*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Pascual-Leone, J., Johnson, J., Baskind, S., Dworsky, S., & Severtston, E. (2000). Culture-fair assessment and the processes of mental attention. In A. Kozulin, & Y. Rand (Eds.), *Experience of mediated learning: An impact of Feuerstein's theory in education and psychology* (pp. 191–214). New York, NY: Pergamon.



- Pascual-Leone, J., Pascual-Leone, A., & Arsalidou, M. (2015). Neuropsychology still needs to model organismic processes “from within”. *Behavioral and Brain Sciences*, 38, e83:33–35. doi:10.1017/s0140525x14000983
- Pennings, A. H., & Hessels, M. G. P. (1996). The Measurement of mental attentional capacity: A neo-piagetian developmental study. *Intelligence*, 23(1), 59–78. doi:10.1016/s0160-2896(96)80006-7
- Powell, T. L., Arsalidou, M., Vogan, V. M., & Taylor, M. J. (2014). Letter and colour matching tasks: Parametric measures of developmental working memory capacity. *Child Development Research*, 2014, 961781:1–9. doi:10.1155/2014/961781
- Rakic, P. (2009). Evolution of the neocortex: A perspective from developmental biology. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(10), 724–735. doi:10.1038/nrn2719
- Rock, I. (1983). *The logic of perception*. Cambridge: MIT Press.
- Schmid, U., Ragni, M., Gonzalez, C., & Funke, J. (2011). The challenge of complexity for cognitive systems. *Cognitive Systems Research*, 12(3–4), 211–218. doi:10.1016/j.cogsys.2010.12.007
- Sharaev, M. G., Zavyalova, V. V., Ushakov, V. L., Kartashov, S. I., & Velichkovsky, B. M. (2016). Effective connectivity within the default mode network: Dynamic causal modeling of resting-state fMRI data. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 14:1–10. doi:10.3389/fnhum.2016.00014
- Sherrington, C. S. (1906). *The integrative action of the nervous system*. New Haven, CT: Yale University Press. doi:10.1037/13798-000
- Sherrington, C. S. (1940). *Man on his nature*. London, Great Britain: Cambridge University Press. doi:10.1017/cbo9780511694196
- Shipstead, Z., Harrison, T. L., & Engle, R. W. (2016). Working memory capacity and fluid intelligence: Maintenance and disengagement. *Perspectives on Psychological Science*, 11(6), 771–799. doi:10.1177/17456916166650647
- Simmering, V. R., & Perone, S. (2013). Working memory capacity as a dynamic process. *Frontiers in Psychology*, 3, e567. doi:10.3389/fpsyg.2012.00567
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643–662. doi:10.1037/h0054651
- Ungerleider, L. G., & Haxby, J. V. (1994). “What” and “where” in the human brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 4(2), 157–165. doi:10.1016/0959-4388(94)90066-3
- van den Bos, E., de Rooij, M., Sumter, S. R., & Westenberg, P. M. (2016). Continued development of recursive thinking in adolescence: Longitudinal analyses with a revised recursive thinking test. *Cognitive Development*, 37, 28–41. doi:10.1016/j.cogdev.2015.11.002
- Witkin, H. A. (1949). The nature and importance of individual differences in perception. *Journal of Personality*, 18(2), 145–170. doi:10.1111/j.1467-6494.1949.tb01237.x
- Witkin, H. A. (1950). Individual differences in ease of perception of embedded figures. *Journal of Personality*, 19(1), 1–15. doi:10.1111/j.1467-6494.1950.tb01084.x
- Witkin, H. A., & Goodenough, D. R. (1981). *Cognitive styles: Essence and origins. Field dependence and field independence. Psychological Issues, Monograph 51*. N.Y.: International Universities Press.



## ■ обзор литературы ■

# Конструктивные операторы в работе познания: ментальное внимание в онтогенезе

### Мари Арсалиду

Департамент психологии, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Российская Федерация;  
Факультет психологии, Йоркский университет, Торонто, Канада

### Хуан Паскуаль-Леоне

Факультет психологии, Йоркский университет, Торонто, Канада

### Джанис М. Джонсон

Факультет психологии, Йоркский университет, Торонто, Канада

### Татьяна Котова

Лаборатория когнитивных исследований, Российская академия народного хозяйства и государственной службы (РАНХиГС), Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Существует множество теорий, предлагающих объяснение механизмов познавательных процессов у взрослых. Несколько меньшее число теорий призваны объяснить, как эти когнитивные механизмы изменяются в ходе развития, и лишь немногие направлены на то, чтобы соотнести механизмы когнитивного развития с работой мозга. Одной из таких теорий является теория конструктивных операторов. В данном обзоре мы рассматриваем основные положения этой теории, а также ее возможности по построению количественных предсказаний относительно развития базовых когнитивных способностей на примере емкости ментального внимания. В частности, модель эндогенного ментального внимания описывает общий когнитивный ресурс, емкость которого возрастает на протяжении детства и подросткового периода и представляет собой фундаментальный фактор, который вносит вклад в индивидуальные различия в познавательных способностях. Емкость ментального внимания увеличивается по мере развития префронтальных областей головного мозга. Мы приведем примеры использования метода метасубъектного анализа задачи — современного метода для оценки требований задачи к емкости ментального внимания. В целом теория конструктивных операторов, в том числе представления о соотношении операторов с нейроанатомическими структурами, а также основанные на этой теории измерительные методы и метод метасубъектного анализа задачи будут полезны для психологов, а также специалистов в области образования и нейронауки, интересующих различными аспектами когнитивного развития.

**Контактная информация:** Мари Арсалиду, [marie.arsalidou@gmail.com](mailto:marie.arsalidou@gmail.com), 101000, Москва, Россия, Армянский пер., 4с2, Департамент психологии, НИУ ВШЭ; Хуан Паскуаль-Леоне, [juanpl@yorku.ca](mailto:juanpl@yorku.ca); Джанис М. Джонсон, [janicej@yorku.ca](mailto:janicej@yorku.ca); Татьяна Котова, [tkotova@gmail.com](mailto:tkotova@gmail.com).

**Ключевые слова:** теория конструктивных операторов, оператор, схема, развитие ментального внимания, емкость ментального внимания, метасубъектный анализ задачи, когнитивное развитие

© 2019 Мари Арсалиду, Хуан Паскуаль-Леоне, Джанис М. Джонсон, Татьяна Котова. Данная статья доступна по лицензии [Creative Commons "Attribution" \(«Атрибуция»\) 4.0. всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), согласно которой возможно неограниченное распространение и воспроизведение этой статьи на любых носителях при условии указания автора и ссылки на исходную публикацию статьи в данном журнале в соответствии с канонами научного цитирования.

**Благодарности.** Данная статья была подготовлена при частичной поддержке Российского научного фонда (проект №17-18-01047).

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2019 г. Принята в печать 27 июня 2019 г.

## Введение

К настоящему моменту предложено множество теорий для объяснения механизмов, стоящих за функционированием когнитивных процессов и интеллекта человека (см., например, Ackerman, 1996; Anderson et al., 1998; Das et al., 1975). В основу многих моделей в данной области положено понятие рабочей памяти (Baddeley, 2000; Cowan, 2005; Ericsson, Kintsch, 1995), которое описывает систему процессов, позволяющих временно сохранять и обрабатывать информацию в ходе достижения целей познавательной активности. Авторы большинства таких моделей согласны между собой в том, что рабочая память имеет ограниченную емкость, однако лишь немногие из них предлагают объяснение механизма подобных ограничений. В целом ограничения когнитивных процессов получают более удачное объяснение в теориях, рассматривающих познание через призму его развития и анализирующих рост когнитивных возможностей и усложнение доступных задач в зависимости от возраста (см., например, Case, 1992; Demetriou, Spanoudis, 2018; Halford et al., 1998; Halford et al., 2007; Pascual-Leone, 1970). В данной статье мы остановимся на *диалектико-конструктивистской* (Pascual-Leone, 1987, 2014; Pascual-Leone, Johnson, 2005) *общей теории когнитивного развития* — теории конструктивных операторов (ТКО) — и рассмотрим ее преимущества в предсказании и объяснении успешности в решении тех или иных когнитивных задач.

Теория конструктивных операторов зародилась в 1960-х гг., и первая посвященная ей публикация представляла собой математическую модель, позволяющую предсказывать различия между стадиями развития интеллекта в теории Ж. Пиаже (Pascual-Leone, 1970). В современном виде теория конструктивных операторов посвящена описанию когнитивного развития в целом и основана на модели решения различных когнитивных задач (Arsalidou et al., 2010; Pascual-Leone, 1970, 1995, 1996, 2014; Pascual-Leone, Johnson, 2011; Pascual-Leone et al., 2015). На нее оказали влияние как конструктивистская теория развития Ж. Пиаже, так и культурно-исторический подход Л.С. Выготского и А.Р. Лурии (Pascual-Leone, 1987, 1995, 1996, 2012, 2014; см. также Miller, 2011), а также данные нейропсихологии и нейронауки в целом. Центральным для теории конструктивных операторов является понятие ментального внимания. Данное понятие связано с первым и третьим блоками функциональной системы мозга в модели А.Р. Лурии (1973), а именно с регуляцией активации мозга и с программированием, регуляцией и контролем сложных форм деятельности. Конструкт «ментальное/эндогенное внимание» был предложен в русле объединения и развития идей Ж. Пиаже и А.Р. Лурии; он рассматривается как ресурс мозга с ограниченной емкостью, который позволяет объяснить изменения, происходящие в ходе созревания рабочей памяти (Pascual-Leone, 2000, 2019; Arsalidou et al., 2010).

Опираясь на существующие данные в области когнитивного развития (неопиажегетический подход) и в области нейронауки, можно увидеть, что неспецифическая активация и автоматическое внимание (пер-

вый функциональный блок в модели А.Р. Лурии) тесно взаимодействуют с интеллектуальным/произвольным/ментальным (или эндогенным) вниманием, но в то же время хорошо отличимы от него. Ментальное внимание является неявным специфическим регуляторным/ресурсным оператором, который реализован в мозге через влияние префронтальной коры (возбуждающее или тормозящее), осуществляемое благодаря связям префронтальной коры и базальных ганглиев с таламусом и регулируемое с помощью специфических нейронных сетей, работающих на медленных нейротрансмиттерах (в частности, дофаминэргических). Мы считаем, что эндогенное внимание связано с третьим функциональным блоком мозга в модели А.Р. Лурии.

Емкость ментального внимания рассчитывается как количество элементов, которые человек может удерживать *в уме* без опоры на наблюдаемую ситуацию (то есть с которыми он работает с наибольшей *умственной центрацией*). С точки зрения организма в качестве таких элементов выступают *схемы* — нейронные сети, позволяющие хранить информацию и использовать ее при решении различных задач. Помимо *схем* (операторов, выработанных в ходе индивидуального развития), в теории конструктивных операторов выделяются *скрытые* (недоступные для осознания) системные<sup>1</sup> операторы, такие как, например, ментальное внимание (то есть не зависящие от содержания, но связанные с особенностями функционирования мозга правила и процедуры) и организующие *принципы* (общие правила; Pascual-Leone, 1969, 1970, 1995; Pascual-Leone, Johnson, 1991, 2005, 2011; см. рисунок 1). Операторы являются универсальными, независимыми от содержания регуляторными механизмами, которые могут быть применены к схемам, относящимся к любой области, и осуществляют мониторинг использования этих схем посредством специальных схем управляющего контроля. С психологической точки зрения схемы выступают как автоматически активирующиеся единицы хранения информации и могут быть разделены на три класса: управляющие, операциональные и фигуративные (рисунок 1).

Предложенный в рамках ТКО принцип избыточности исходно включенных в решение задачи схем (ИИРС; *schematic overdetermination of performance principle*; Pascual-Leone, Johnson, 1991, 1999, 2005, 2011) описывает распространение активации в мозге. Он может рассматриваться как обобщение на функционирование всего мозга *принципа общего конечного пути*<sup>2</sup>, сформулированного Ч. Шеррингтоном (Sherrington, 1906; McFarland, Sibly, 1975) для описания активации моторных нейронов. Принцип ИИРС определяет, какие схемы в данной ситуации вносят свой вклад в решение задачи. Он предполагает, что решение любой текущей задачи является продуктом *всех совместимых схем, активированных и реализуемых в данный момент*, и что количество этих схем превышает необходимое для решения задачи (избыточность).

<sup>1</sup> Англ. *organismic* — термин теории Ж. Пиаже, указывающий на системный характер процессов психического развития и их связь с процессами адаптации биологического организма. — *Примеч. ред.*

<sup>2</sup> В литературе также обозначается как «принцип конвергенции возбуждения» или «воронка Шеррингтона». — *Примеч. ред.*

По-видимому, Шеррингтон все же рассматривал возможность обобщения принципа конвергенции на функционирование всей нервной системы, поскольку он пишет: «В том, что касается „психического“, интеграция процессов в нервной системе не происходит посредством их централизованного схождения к одной „епископальной клетке“<sup>3</sup>. Напротив, она вырабатывается посредством демократии миллионов клеток»<sup>4</sup> (Sherrington, 1940, p. 277).

Применительно к ИИРС все активированные и соответствующие данному случаю схемы (в силу их способности к автоматическому запуску, или функции ассимиляции по Пиаже) одновременно применяются для достижения результата. Несоответствующие друг другу схемы конкурируют между собой, и уже наиболее активированные используются для решения задачи, другие же — тормозятся и не могут быть использованы в дальнейшем.

В дезориентирующих ситуациях, когда активируется большое число не соответствующих цели схем, эндогенное ментальное внимание, как оно понимается в ТКО, может рассматриваться как интеллектуальное/произвольное внимание: «пятно света» работающего сознания, которое создается посредством активации соответствующих задаче взаимодействующих универсальных нейронных систем (скрытых операторов), локальных информационных процессов (схем — предметно-специфических операторов) и общих правил их регуляции (принципов, работающих на уровне организма). Подобный динамический синтез дает начало мыслям и действиям внутри системы ментального внимания с ее ограниченной емкостью и символической организацией. В так называемых направляющих ситуациях простая активация всех схем легко приводит к достижению цели, но в дезориентирующих ситуациях ресурс ментального внимания необходим для поддержания приоритета релевантных задаче схем и достижения желаемого результата. Емкость ментального внимания увеличивается с возрастом и может быть количественно оценена с помощью задач, основанных на дезориентирующих ситуациях (Pascual-Leone, 1970; Pascual-Leone, Johnson, 2011).

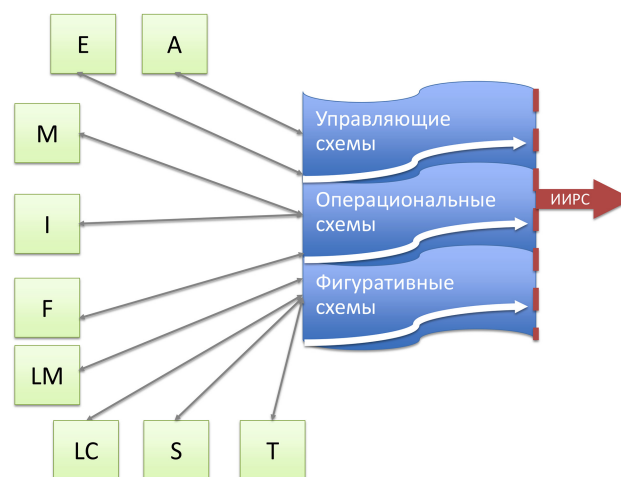
В качестве методики, позволяющей оценивать и предсказывать уровень требований к когнитивной обработке со стороны ситуации или задачи, используется метасубъектный анализ задачи (*metasubjective task analysis*; Arsalidou et al., 2010; Pascual-Leone, Johnson, 1991, 2005, 2011). Данный метод анализа назван в рамках теории ТКО метасубъектным (от греч. μετά- — между, после, через), поскольку в процессе его реализации исследователь рассматривает конкретную задачу как бы с точки зрения психических процессов решающего ее субъекта (Pascual-Leone, 2013;

Pascual-Leone, Johnson, 2017). Данная техника оценивает требования к когнитивной обработке со стороны задачи; она опирается на допущение о наличии у субъекта, пытающегося решить задачу, определенного репертуара схем и нейронных ресурсов (операторов и принципов функционирования). Далее мы детально обсудим модель ментального внимания и метод анализа задачи наряду с операторами, схемами и принципами, лежащими в основе модели.

## Операторы, схемы и принцип ИИРС в теории конструктивных операторов

### Операторы

Операторы представляют собой содержательно-неспцифические ресурсы «оборудования» мозга, то есть анатомические и структурно-функциональные ограничения, задающие специфические правила; при наличии определенных регуляторных возможностей эти правила могут быть использованы субъектом для организации ресурсов в ходе динамического синтеза деятельности в соответствии с его намерениями (Pascual-Leone, 1970; Pascual-Leone, Johnson, 1991, 2005, 2011). Таким образом, ТКО предлагает набор операторов (таблица 1), соответствующих конкретным правилам, объясняющим такой синтез и возникновение новой деятельности. Эти операторы могут быть полностью проинтерпретированы в терминах функциональной динамики или регуляторных процессов мозга (Pascual-Leone, Johnson, 2005; Arsalidou, Pascual-Leone, 2016). Исключение любого из операторов должно приводить к заметному когнитивному дефициту.



**Рисунок 1.** Упрощенная схема теории конструктивных операторов. Операторы изображены зеленым: A = affective (аффективный), E = executive (управляющий контроль), M = mental attention (ментальное внимание), I = inhibition (отторгивание), F = field factor (поле внутреннего плана), LM = learning using mental attention (научение с использованием ментального внимания), LC = learning using content (научение логическим структурам через изучение конкретного материала), S = spatial (пространственный), T = temporal (временной); схемы изображены синим; принцип избыточности исходно включенных в решение задачи схем (ИИРС) изображен красной стрелкой. Названия и определения операторов приведены в таблице 1

<sup>3</sup> Епископальная клетка (клетка-иерарх, англ. pontifical cell) — термин, предложенный У. Джеймсом в «Принципах психологии» (James, 1890) для обозначения представления о мозговой организации сознания, к которому отсылает читателя в своей работе Ч. Шеррингтон. Епископальная клетка — это гипотетический нейрон, который стоит во главе иерархии нервных клеток и единственный среди них связан с сознанием. — Примеч. ред.

<sup>4</sup> Англ.: “Where it is a question of ‘mind’ the nervous system does not integrate itself by centralization upon one pontifical cell. Rather it elaborates a million-fold democracy whose each unit is a cell.”

Поскольку системные операторы содержательно неспецифичны, их применение субъектом (а также теоретической интерпретация) не ограничены конкретным материалом или ситуациями, относящимися к конкретной предметной сфере. В этом заключается значительное преимущество данной теории перед другими (например, теорией рабочей памяти А. Бэддели; Baddeley, 2000).

В рамках ТКО виды операторов обычно кодируются аббревиатурой обозначений общей функции, которую они представляют (см. например, Pascual-Leone, Johnson, 1991, 2005, 2011). В таблице 1 представлены ключевые операторы, их функциональный смысл и отделы мозга, которые считаются ответственными за их реализацию; операторы приведены в предполагаемом теории порядке их эволюционного появления (Arsalidou, 2003; Pascual-Leone, 1989; Pascual-Leone, Johnson, 1991, 2005). Предполагается, что операторы появились в ходе эволюции, как и все биологические свойства организмов, и последовательность их появления в ходе развития (как онтогенетического, так и филогенетического) обусловлена сочетанием их необходимости для выживания и сложности: в большей степени необходимые для выживания и менее сложные по своей структуре операторы должны появляться первыми. В связи с этим можно ожидать, что до определенной степени рассматриваемая эволюционная последовательность будет проявляться и в развитии ребенка, от рождения до подросткового периода, а в обратном порядке — при угасании когнитивных функций в процессе старения. Данная последовательность берет свое начало от реализации биологических потребностей и базовых аффективных процессов, проходит через освоение действий в окружающей среде и наблюдение и усвоение устойчивых инвариантов, вплоть до появления организованного, целенаправленного решения задач на определенном уровне абстракции. Представления о таком порядке появления операторов основываются на эмпирических данных как о филогенезе, так и об онтогенезе (Gogtay et al., 2004; Morgane et al., 2005; Rakic, 2009). К примеру, с точки зрения филогенеза мы знаем, что лимбическая система, берущая свое начало в срединных структурах мозга и обслуживающая формирование эмоций и непосредственно мотивированных действий, является более древней структурой по сравнению с неокортексом, происходящим из переднего мозга (Morgane et al., 2005). Таким образом, операторы, регулирующие аффект, должны появляться первыми. Также операторы, регулирующие активность более низких когнитивных уровней, например пространственные и временные аспекты восприятия, связанные с теменными и височными отделами, должны обнаруживаться на более ранних этапах развития, нежели операторы, регулирующие более высокоуровневые психические процессы, реализуемые префронтальными отделами, что в некотором смысле утверждали еще Лейбниц и Кант. Автоматическое структурирование времени (*T*-оператор) и пространства (*S*-оператор) является необходимым условием для формирования какого-либо абстрактного знания; оно реализуется в вентральном (затылочно-височном) и дорсальном (затылочно-теменном) путях переработки зрительной

информации соответственно (см. обзор в Katsner, Ungerleider, 2000; Ungerleider, Haxby, 1994).

Существует целый ряд исследований развития мозга в ходе онтогенеза, направленных на оценку созревания серого вещества по мере взросления ребенка. Они демонстрируют, что созревание начинается с сомоторных областей, дольше продолжается в височных и теменных областях коры, а в префронтальной коре активно осуществляется вплоть до юношеского возраста (Gogtay et al., 2004). Предлагаемая в теории конструктивных операторов эволюционная интерпретация схем согласуется с идеей различения нескольких иерархических функциональных систем в коре (то есть первичного, вторичного и третичного уровней ассоциативных областей коры, представлениями о которых оперирует, в частности, А. Р. Лурия [Luria, 1973, 1980] и которые соответствуют различным уровням сложности обработки информации). Идеи Л. С. Выготского и А. Р. Лурии в целом оказали влияние на ТКО (Pascual-Leone, 1987, 1996, 2014; Pascual-Leone et al., 2000). К примеру, в теории конструктивных операторов выделяются различные категории схем. Операциональные и фигуративные схемы реализуются соответственно передними и задними отделами коры головного мозга (схемы управляющего контроля являются подвидом операциональных схем). Такое понимание было во многом сформулировано под влиянием идей А. Р. Лурии (Luria, 1970) об организации работы мозга. Здесь особенно важно подчеркнуть, что уникальность теории конструктивных операторов в интерпретации когнитивного развития заключается в том, что в ней предложены механизмы, которые могут объяснить основные закономерности праксиса, модульной организации и динамического синтеза схем, с учетом одновременно и врожденных механизмов и социокультурного научения (см. Pascual-Leone, 1996).

В зрелом и эффективном мозге (подразумевается, что таковым он становится у взрослого человека при нормативном развитии) операторы и схемы вовлечены в адаптивные и гибкие иерархические взаимодействия (обычно называемые *гетерархией*). В простых ситуациях, не требующих умственного усилия, познавательные процессы могут быть реализованы и скоординированы с помощью одних только *T*- и *S*-операторов. Временной *T*-оператор (*temporal*) представляет собой происходящее без умственных усилий структурирование во времени последовательностей активируемых схем или, иными словами, репрезентацию интериоризированных и сохраненных в качестве следов эпизодической памяти инвариантных последовательностей. Эти постоянно образующиеся *T*-структуры составляют последовательные чанки, которые часто могут быть спонтанно выучены и воспроизводятся без вмешательства *M*-оператора (мы определим его ниже). К примеру, когда мы читаем текстовое сообщение, чтобы понять его, мы без умственных усилий активируем репрезентацию последовательностей включенных в него схем (вложенных значений составляющих его фраз и отдельных слов); это происходит благодаря работе *T*-оператора. Сходным образом пространственный (*spatial*) *S*-оператор автоматически воссоздает структуру относительного взаиморасположения перцептивно-



пространственных схем, конструктивно абстрагируя из них эти отношения (взаимосвязанные паттерны их коактивации «здесь-и-сейчас»). Так, например, мы с легкостью, без особых умственных усилий, представляем общий план дома, в котором были, и сможем узнать его по набору архитектурных чертежей или можем сравнить большой аэропорт с маленьким, используя их пространственные характеристики (конфигурацию частей, размеры и др.).

Более сложные ситуации требуют включения дополнительных операторов, и применение некоторых из них (*M*- и *I*-операторов) требует намеренных умственных усилий. Когнитивные операции в *разнообразных* комплексных ситуациях складываются из скоординированных схем, которые активируются, тормозятся или специфически регулируются с помощью операторов, обладающих соответственно различающимися регуляторными характеристиками. Например, даже при условии некоторого опыта обучения математике для большинства из нас расчет интеграла будет сложной задачей. В процессе решения этой задачи мы будем планировать шаги на пути к решению и определять, какие параметры существенны, а какие нет. Чтобы отрегулировать/скоординировать когнитивные операции в процессе решения этой задачи, нам понадобится целый набор сменяющих друг друга схем управляющего контроля, мониторинг которых будет осуществлять оператор управления (executive), *E-оператор*. *E*-оператор в каждой ситуации производит эффективную организацию управляющего контроля, реализуя его посредством преобладающих среди активированных в текущей ситуации и совместимых между собой схем управляющего контроля, имеющихся в репертуаре человека. Схемы управляющего контроля выступают как сознательные умственные стратегии, которые активируются, когда это необходимо для текущей задачи. Эти управляющие схемы (*control executives*) служат для регуляции функционирования других системных операторов (таких как *M* и *I*), облегчая их применение к схемам действий в ходе решения задачи. Их работу дополняют схемы управляющего контроля на уровне задачи (*task executives*), которые определяют, какие именно *схемы действия* будут использованы в данной задаче, а также порядок их применения.

Следующий оператор, о котором пойдет речь, был введен в модель для объяснения функций *ментального* внимания. Мы называем его ментальным, поскольку, в отличие от перцептивного автоматического внимания, оно *активируется изнутри и поддерживается сознательным усилием* (усилием работы разума); это эндогенное внимание, благодаря которому происходит произвольная активация схем, релевантных текущей задаче. Оно активирует схемы (внутреннюю или внешнюю информацию), активация которых не провоцируется самой ситуацией, но которые необходимо поддерживать в сознании или использовать в ходе действий. В соответствии с подходом Х. Паскуаля-Леоне (Pascual-Leone, 2019; Pascual-Leone, Johnson, 2005, 2011, in press) ментальное внимание можно представить как функциональную систему, заданную четырьмя отдельными недоступными для прямого наблюдения

операторами: *E* (executive, оператор управляющего контроля, — релевантные текущей задаче схемы управляющего контроля), *M* (mental-activation booster, усилитель активации схем, задействованных в решении), *I* (inhibition, оттормаживание автоматически активирующихся схем, нерелевантных для решения) и *F* (field, оператор, реализующий ту же функцию, что и фактор поля для простых синтезов в неогештальтизме, — тенденцию к минимизации). Эти четыре оператора в своем взаимодействии и создают ментальное внимание. Данная форма внимания также может быть названа эндогенным, интеллектуальным, произвольным вниманием или системой/функцией управления вниманием (executive attention). В теории конструктивных операторов выбран термин «ментальное», поскольку функции управляющего контроля обнаруживаются не раньше 12-месячного возраста, тогда как ментальное, или эндогенное, внимание может быть обнаружено у 3-4-месячных младенцев (Hendry et al., 2016; Johnson et al., 1991).

Оператор ментального внимания, *M-оператор*, возможностями которого определяется емкость ментального внимания конкретного человека, позволяет намеренно усилить активацию релевантных задач схем, если посредством других операторов (например, *S*-, или *T*-, или *F*-, или *A*-оператора) они были активированы недостаточно. Таким образом, он позволяет произвольно использовать энергию ментального внимания для решения задач. *M*-оператор имеет ограниченные возможности, которые увеличиваются с возрастом вплоть до подросткового периода. Ограничения ментального внимания часто являются причиной затруднений, возникающих при одновременном выполнении нескольких задач, и частично объясняют эффективность пошаговых стратегий решения задач. Оттормаживание как функция внимания (attentional inhibition), или *I-оператор* (другими словами, функция прерывания), позволяет произвольно оттормозить нерелевантные схемы. *I*-оператор является настолько важной составляющей ментального внимания, что одна из ведущих групп исследователей в области изучения рабочей памяти и текущего интеллекта предположила, что процессы внимания, позволяющие решателю отвлекаться от неактуальной информации, являются основополагающей функцией, определяющей индивидуальные различия по текущему интеллекту («относительно более высокий текущий интеллект является показателем умения намеренно отвлекаться от нерелевантной информации» [Shipstead et al., 2016, p. 779]). Исследователи выдвигают это утверждение на основе того, что текущий интеллект наилучшим образом измеряется с помощью так называемых дезориентирующих задач, которые требуют действительно нового решения. В этом текущий интеллект отличается, по их мнению, от рабочей памяти: хотя она и требует оттормаживания нерелевантной информации для реализации своей функции, но основной ее задачей все же является «удержание», то есть дополнительное усиление активации релевантной информации.

Опираясь на эти теоретические представления, мы полагаем, что ментальное внимание является первичным, более общим причинно-обуславливающим

конструктом по отношению как к текучему интеллекту, так и к рабочей памяти, так как этот конструкт позволяет четко дифференцировать и в то же время объединить такие функции внимания, как активация релевантного содержания ( $M$ ) и оттормаживание нерелеванного ( $I$ ). В этом подходе ментальное внимание (система управления вниманием) предстает суперординатной каузальной детерминантой как для удержания информации в рабочей памяти, так и для текучего интеллекта (отвлечения). З. Шипстед с соавторами (Shipstead et al., 2016, p. 784) утверждают, что «наивысший уровень представлен общей способностью ( $g$ ), которую мы рассматриваем как нечто близкое к функции управления вниманием». Теория конструктивных операторов в основном разделяет подобный взгляд, так же как и представление этих исследователей о том, что хранение не является основной функцией рабочей памяти. Согласно этой точке зрения, хранилище информации в рабочей памяти — не действующая причина, а мера способности ментального внимания усиливать активацию того или иного количества единиц информации (Pascual-Leone, Baillargeon, 1994; Pascual-Leone, Johnson, 2005, 2011).

*F-оператор* — это принцип спонтанно реализуемой и автоматически поддерживаемой «простоты» организации (тенденция к минимизации) в динамике нашего *внутреннего поля активации* (internal field of activation; Berthoz, 2012; Rock, 1983). Функционирование данного оператора обеспечивается латеральным торможением в коре головного мозга (Edelman, 1987). Конструкт *F-оператора* соответствует понятию фактора *поля* или *эффектов поля* в (нео)гештальтизме и теории Пиаже (явление, которое также называют завершением гештальта в восприятии или репрезентации, принципом минимума, совместимостью стимула и ответа и так далее). Фактор поля приводит к организации содержания внутреннего плана внимания, внося *завершение* в репрезентации и действия во внутреннем плане, то есть автоматически упрощая и структурируя их как целое (так называемая *прегнантность*), минимизируя их сложность и в то же время максимизируя их адаптивность в условиях существующих внешних и внутренних ограничений.

Как уже обсуждалось, в теории конструктивных операторов *ментальное внимание* предстает как функциональная система мозга, представляющая собой скоординированную работу всех четырех вышеупомянутых операторов. Таким образом, *ментальное внимание* =  $\langle M, E, I, F \rangle$  (Pascual-Leone, Johnson, 2005; 2011; рисунок 2).

Без хотя бы одного из этих операторов становится невозможным аналитическое объяснение общепределяющей функции ментального внимания (эндогенного/произвольного внимания, или управления вниманием), по крайней мере в отношении истинных (то есть новых для субъекта) мыслительных задач, в решении которых проявляется текучий интеллект.

Следующая группа операторов может применяться к уже активированным схемам управляющего контроля и схемам действий для того, чтобы обеспечить научение (Pascual-Leone, Goodman, 1979; Pascual-Leone, Johnson, in press). Наглядно-действенное научение

(content-learning booster), или *C-оператор*, представляет собой простое ассоциативное научение посредством классического и/или оперантного обусловливания и реализуется в соответствующих схемах, полученных в опыте такого простого ассоциативного научения на конкретном материале. Логический (logical) оператор, или *L-оператор*, активизирует освоение логических структур (logical-structural learning) и часто координирует наглядно-действенные и внутренние (опирающиеся на память) процессы обработки информации, что приводит к абстракции отношений. Мы называем данные формы научения логическими, поскольку они позволяют усвоить существенные для решения задачи функциональные инварианты, образующие актуальную (укорененную в опыте) инфраструктуру той деятельности, на основе которой они были выучены, или, говоря в терминах Ж. Пиаже, рефлексивно абстрагированы. При этом совместная работа *L-* и *C-операторов* (*LC-оператор*) обеспечивает автоматизированное научение логическим структурам, которое способствует координации изучения материала посредством избыточного количества повторений, а *L-* и *M-операторов* (*LM-оператор*) — позволяет произвольно осваивать логические структуры с помощью ментального внимания.

Критически важен для познания *аффективный* (affective) *A-оператор*, посредством которого реализуются спонтанная активация/торможение когнитивных схем, релевантных аффектам/эмоциям, возникающим в данной ситуации. В данной статье к *A-оператору* отнесен и оператор, реализующий *лично обусловленные*, аффективно-когнитивные правила, связанные с социальным окружением, который в других работах Х. Паскуаля-Леоне был назван *B-оператором* (Pascual-Leone, Googman, 1979; Pascual-Leone et al., 1978). К этим правилам относятся аффективно-когнитивная активация или торможение схем, связанных с восприятием себя, связанных с ситуацией или задачей, как это, например, происходит при спонтанной мотивации или возбуждении, спровоцированной ситуацией. При организации психологических экспериментов часто бывает непросто мотивировать испытуемых, и мотивация влияет на то, в какой степени они будут прилагать умственные усилия в той или иной ситуации. К примеру, внешнее вознаграждение или удовлетворение какого-либо внутреннего мотива (достижение аффективно заряженной цели) могло бы мотивировать нас взяться за решение сложной задачи расчета интеграла, а то, сколько мы съели за обедом, может изменить активационную силу (*A-оператор*) голода, снижая размер кусочка пирога, который мы выберем на десерт.

## Схемы

Схемы являются носителями информации. Это динамические психологические структуры, самоактивирующиеся при возникновении определенных условий (Pascual-Leone, Johnson, 1991, 2005, 2011). В мозге они представлены нейронными ансамблями и сетями (см. напр., Arsalidou et al., 2017; Sharaev et al., 2016). Схемы модифицируются под влиянием опыта и научения; для тех из них, что чаще применяются, снижается порог активации (в терминологии Ж. Пиаже — происходит ассимиляция), и они с более

**Таблица 1.** Описание операторов и соответствующих им областей мозга в предполагаемом эволюционном порядке (по Arsalidou, 2003 и Pascual-Leone, Johnson, 2005)

Оператор	Описание	Область мозга
A	Специфические процессы аффективной активации или торможения, регулирующие мотивацию и активацию внимания	Лимбическая система
C	Процесс наглядно-действенного изучения конкретного материала и схемы, выведенные из усвоенных в наглядно-действенном плане ассоциативных связей	Первичная и вторичная ассоциативная кора
F	Оператор поля внутреннего плана, наряду с принципом избыточности исходно включенных в решение задачи схем (ИИРС, см. выше), функционирует как <i>связующий механизм</i> в работе мозга и привносит в ментальные репрезентации «завершенность» в неогештальтском смысле	Все области коры
LC	Процесс автоматизированного научения логическим структурам, выделенным на основе рефлексивной абстракции в ходе наглядно-действенного изучения конкретного материала (и других видов научения) в повторяющихся условиях	Правое полушарие
T	Автоматический подбор временной <i>последовательности</i> схем, направленный на координацию структурированных во времени инвариантов, конституирующих <i>удаленные в пространстве (дистальные) объекты</i> , которые обнаруживаются в ходе активной практической деятельности субъекта	Вентральный путь переработки информации (затылочно-височные области коры больших полушарий)
S	Способствует появлению пространственных схем на основе автоматической координации схем, одновременно активированных в той или иной ситуации ( <i>отношение одновременного существования</i> )	Дорсальный путь переработки информации (теменно-затылочные области коры больших полушарий)
B	<i>Реализует лично-обусловленные и психосоциальные</i> схемы, связанные с бытием человека	Сеть пассивного режима работы мозга (нейронная сеть оперативного покоя, default mode network)
I	Прерывание внимания: реализует центральное <i>активное отторжение</i> нежелательных схем, активированных ситуацией или за счет внутренней психической динамики	Префронтальная кора
M	Намеренная и сопровождающаяся внутренним усилием <i>активация</i> простых или сложных схем за счет ментального внимания (под сложными схемами имеются в виду соответствующие функциональным системам)	Префронтальная кора
LM	Научение логическим структурам благодаря целенаправленной и сопровождающейся умственным усилием обработке информации во внутреннем плане внимания	Третичные (ассоциативные) зоны коры левого полушария
E	Оператор управляющего контроля — то есть доминирующая <i>группа активированных схем управляющего контроля</i> из репертуара субъекта, способствующая решению текущей задачи	Префронтальная кора

высокой вероятностью вовлекаются в релевантные для них ситуации с соответствующими ключевыми стимулами. К примеру, если вы обычно водите машину в Москве, где правостороннее движение, но однажды окажетесь за рулем в Лондоне, где движение левостороннее, вероятнее всего, вы начнете искать ручной тормоз не с той стороны или поедете по неправильной стороне дороги.

Когнитивные схемы (то есть структуры, несущие информацию, которая может быть квалифицирована как истинная, ложная или неопределенная) могут быть разделены на три различных категории (Pascual-Leone, Baillargeon, 1994; рисунок 1):

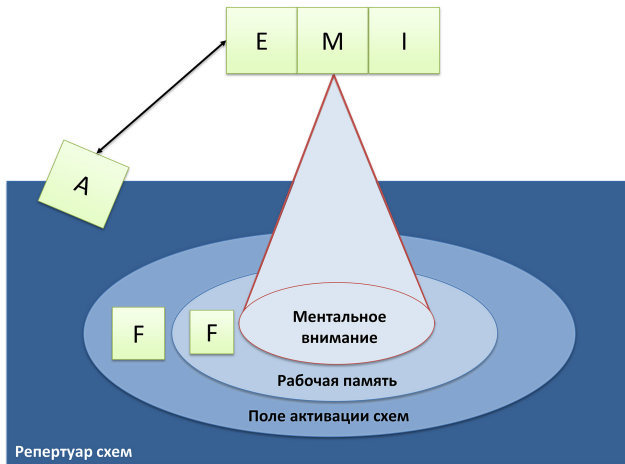
(а) *фигуративные* схемы обеспечивают восприятие и репрезентацию понятий или объектов (например, яблоко);

(б) *операциональные* схемы представляют собой основу для действий и специфических процедур, применяемых к объектам или понятиям (например, съесть яблоко);

(в) *схемы управляющего контроля* (executive schemes) — это подгруппа операциональных схем, ре-

ализующих обобщенные процедуры (например, планирование того, как очистить, разрезать и съесть яблоко), применяемые в различных содержательных областях, чтобы регулировать специфическое функционирование других операторов (например, M-, или I-, или L-, или A-оператора), в то время как они изменяют активацию схем (Pascual-Leone, Johnson, 1991, 2005, 2011).

Адаптивные для конкретной ситуации функциональные иерархии (так называемые *гетерархии*) схем создают динамические интерфейсы, координирующие применение схем разного уровня сложности с учетом семантического *контекста* отдельных предметных областей. Например, реальное яблоко для ребенка может означать хороший школьный завтрак или, если он не голоден, но хочет играть, послужить объектом для жонглирования; в то же время для студента слово «яблоко» может означать пример фрукта или, что даже более вероятно, относиться к марке его компьютера. Аналогично молоток может быть использован для забивания гвоздя, но может также послужить грузом, если будет привязан к веревке.



**Рисунок 2.** Модель эндогенного ментального внимания. Эта упрощенная схема демонстрирует основные операторы, вовлеченные в поддержание ментального внимания: *E*-, *M*-, *I*-, *F*- и *A*-операторы обозначены буквами, а принцип ИИРС — красным цветом. Соотнесение элементов модели с нейроанатомическими структурами, реализующими их функции, представлено в таблице 1

### Принцип избыточности исходно включенных в решение задачи схем (ИИРС)

В процессе решения задачи высшие млекопитающие задаются целью, для достижения которой мобилизуются различные операторы, которые активируют и приспособливают релевантные и оттормаживают нерелевантные схемы. При этом операторы, подразумевающие намеренные усилия решателя (такие как *M* или *I*), имеют ограничения на количество отдельных схем, с которыми они могут одновременно работать (Pascual-Leone, 2006). Из-за этого в дезориентирующих ситуациях релевантным схемам приходится конкурировать за активацию. Некоторые схемы получают преимущество и в конечном итоге применяются и приводят к определенному результату в плане поведения или в умственном плане. Это происходит в соответствии с принципом ИИРС (Pascual-Leone, Johnson, 1991), который направляет процесс динамической конкуренции между схемами, когда одним из них удается временно возобладать над другими. К схемам в данном случае относятся функциональные структуры, поведенческие или психические, то есть сложные схемы, часто называемые термином «схема» в более узком, логико-философском, смысле (schema). Активированные схемы в соответствии с принципом ИИРС совместно влияют на результат деятельности. Заметим, что схемы управляющего контроля не могут изменить сам ИИРС-принцип, но они могут, активируя/тормозя схемы действий, изменять полученный в соответствии с этим принципом результат. ИИРС-принцип наряду с *F*-оператором обеспечивает интеграцию и завершенность структур (прегнантность), благодаря чему наиболее информативные и высоко активированные (преобладающие) схемы применяются легче всего. К примеру, когда мы завершаем предложение «Чтобы нарезать хлеб, мне нужно взять...», по-видимому, подключается и активируется большой набор схем. Для большинства из нас наиболее «сильной» среди них будет схема «нож», по причине ее частотности в этом контексте. Кроме того, сила схемы, которая бу-

дет применена, часто проявляется через время реакции и подвержена влиянию предшествующих событий. Исследования явлений прайминга показали, что предыдущие события могут позитивно или негативно влиять на последующий выбор (см. обзор в Frings et al., 2015; Hutchinson, 2003).

## Модель эндогенного ментального внимания

Эндогенное ментальное внимание (рисунок 2), функциональная система четырех операторов (*E*, *M*, *I*, *F*), является комплексным динамическим процессом, в ходе которого операторы и схемы субъекта образуют единую рабочую систему, направленную на создание того или иного когнитивного продукта или выполнение того или иного действия. С точки зрения теорий рабочей памяти данную модель можно было бы также рассмотреть как систему вложенных психологических конструктов, в которой ментальное внимание является частью рабочей памяти, а рабочая память находится в поле активированных схем, которое, в свою очередь, входит в общий репертуар схем, или в долговременную память (см., напр., Pascual-Leone, Johnson, 1991, 2005, 2011). *E*-оператор осуществляет выбор и координацию схем в решении текущей задачи и использует *M*- и *I*-операторы, чтобы регулировать степень активации схем в соответствии с данной ситуацией. Принцип ИИРС, совместно с *F*-оператором, работает на каждом из уровней (рисунок 2) и определяет, какие именно схемы будут применены в конечном итоге к решению задач.

*M*-оператор является ограниченным неспецифическим ресурсом, максимальное численное выражение которого, или *емкость* которого, можно определить как максимально возможное количество схем, к которым *M*-оператор может быть одновременно применен в процессе поддержания ментального внимания. В соответствии с теорией конструктивных операторов емкость *M*-оператора в период, когда уже возможна обработка *символической* информации во внутреннем плане (то есть в норме начиная с трехлетнего возраста), увеличивается в среднем на одну единицу каждые два года, достигая к 15–16 годам в среднем семи единиц — то есть емкости *M*-оператора, характерной для взрослого человека (Pascual-Leone, 1970, 2012, 2019; Pascual-Leone, Johnson, 2005, 2011; таблица 2). Такая функция роста емкости ментального внимания с возрастом показана в широком ряде работ (см., напр., Agostino et al., 2010; Arsalidou et al., 2010; Arsalidou, Im-Bolter, 2016; Bereiter, Scardamalia, 1979; Im-Bolter et al., 2006; Johnstone, El-Banna, 1986; Johnson et al., 2003; Lawson, 1983; Morra, 2001; Morra et al., 2011; Morra et al., 2013; Pascual-Leone, 1970; Pascual-Leone, Baillargeon, 1994; Pascual-Leone, Johnson, 2005, 2011; Pennings, Hessels, 1996; Powell et al., 2014). Оценка максимальной емкости *M*-оператора в 7 единиц, которую предлагает теория конструктивных операторов, на первый взгляд вступает в противоречие с оценками в 4–5 единиц, предложенными в некоторых современных теориях для зрелой способности к удержанию информации



в рабочей памяти у взрослых (например, Cowan, 2001; Cowan et al., 2015; Halford et al., 2007). Однако предсказания этих теорий в отношении того, как данный показатель должен изменяться в ходе развития, расходятся с тем, что показывают обзоры реальных исследований с участием испытуемых в возрасте от 5 до 12 лет (напр., Arsalidou, 2013; Pascual-Leone, Johnson, 2011; Simmering et al., 2013), а также противоречат результатам анализа задач Пиаже на формально-логические операции (Pascual-Leone et al., 2012).

Соответствующий тому или иному возрасту показатель может быть измерен с использованием задач, для которых есть возможность достаточно четко рассчитать предъявляемые ими требования к *M*-оператору. Требования к *M*-оператору со стороны задачи — это минимальное количество отдельных схем, которые субъект должен активировать одновременно для того, чтобы решить задачу. Измерить сложность задачи с точки зрения емкости *M*-оператора, необходимой для ее решения, можно с помощью основывающегося на теории конструктивных операторов метода метасубъектного анализа задачи (анализа «изнутри»; Pascual-Leone, 1970, 1987; Pascual-Leone, Baillargeon, 1994; Pascual-Leone, Johnson, 1991, 2005, 2011). У детей и подростков в норме емкость *M*-оператора растет с возрастом. К примеру, задача с требованиями к *M*-оператору в объеме четырех единиц в норме может быть решена детьми 9–10 лет или старше (то есть теми, у кого емкость *M*-оператора позволяет одновременно работать как минимум с четырьмя схемами; см. таблицу 2).

## Направляющие и дезориентирующие ситуации

Для теории конструктивных операторов особенно важно различие между направляющими и дезориентирующими ситуациями. Определение того, в какой степени данная ситуация является направляющей или дезориентирующей, помогает понять, какие операторы выйдут на сцену в данном случае. Рассмотрим континуум, на одном крае которого находятся простые ситуации с очевидным решением, а на другом — сложные ситуации, в которых решение скрыто и его поиск требует серьезных усилий. Это и будет различие между так называемыми направляющими и дезориентирующими ситуациями (Pascual-Leone, 1970, 1980, 1989). Говоря точнее, ситуация считается *дезориентирующей*, если она требует большего объема обработки информации за счет привлекающих внимание, но нерелевантных признаков или иным образом провоцирует процессы, которые активируют схемы, вызывающие появление ошибок в процессе решения задачи (Pascual-Leone, 1989; Pascual-Leone, Johnson, 2005).

Дезориентирующие ситуации часто содержат системные признаки, интерферирующие с текущей задачей, или провоцируют появление конкурирующих планов и стратегий, которые необходимо аккуратно и последовательно различать для достижения желаемого результата (Pascual-Leone, Baillargeon, 1994). Системные (или *вложенные*, *embedding*) признаки — это такие признаки ситуации, которые, благодаря пер-

Таблица 2. Прогнозируемая максимальная емкость ментального внимания при обработке символически представленной информации как функция от хронологического возраста — начиная с трех лет

Хронологический возраст	Емкость <i>M</i> -оператора = $e + k$
3–4 года	$e + 1$
5–6 лет	$e + 2$
7–8 лет	$e + 3$
9–10 лет	$e + 4$
11–12 лет	$e + 5$
13–14 лет	$e + 6$
15+ years	$e + 7$

Примечание. Емкость *M*-оператора рассчитывается как  $e + k$ , где  $e$  — емкость сенсомоторного компонента *M*-оператора, развивающегося до трехлетнего возраста (сенсомоторная обработка). Данный компонент *M*-оператора позволяет реализовать общие *схемы управления* при решении символических задач.  $k$  — количество символических *схем действий* во внутреннем плане (или внутренних символических действий), которые могут быть удержаны одновременно во внутреннем плане внимания в ходе решения задачи и к которым не относятся *схемы управляющего контроля*.

цептивной обработке (в частности, гештальт-принципам) и процессам научения, воспринимаются как совместно интегрированные в единый перцептивно заметный объект, аспект ситуации или ситуативный паттерн. Подобное явление можно наблюдать, когда человек ищет рисунок в «контексте множественных вложений» («embedding context»; Witkin, 1949; Witkin, Goodenough, 1981). В тесте включенных фигур Г. Уиткина (Witkin, 1950) фигура, которую необходимо найти (например, треугольник), вложена в сложную компоновку целого набора пересекающихся фигур. Искомый рисунок называется включенным потому, что каждая из его частей — каждая из сторон треугольника — также принадлежит к общей композиции, а в ее рамках относится к трем другим объектам или частям этой композиции.

Другим примером дезориентирующих ситуаций может быть задача Струпа (Stroop, 1935), в которой необходимо избегать автоматического прочтения слов, обозначающих цвет, и направлять внимание на цвет, которым напечатаны эти слова (Arsalidou et al., 2013). Задача Струпа хорошо известна как инструмент для измерения оттормаживания (см. обзор в MacLeod, 1991), поскольку для грамотного человека чтение является автоматическим процессом, а потому должно быть отторжено, чтобы внимание могло быть перенаправлено на цвет шрифта и человек мог его назвать даже в том случае, когда он не совпадает со значением слова. В целом для того, чтобы в дезориентирующих ситуациях сфокусироваться на релевантных схемах, мы должны активно оттормаживать в них перцептивно заметные и запускающие автоматические процессы дистракторы. Дистракторами могут быть

как нерелевантные признаки (например, окружающие линии на рисунке в тесте вложенных фигур), так и нерелевантные действия (например, автоматическое прочтение слова, обозначающего цвет, в тесте Струпа).

Кроме того, дезориентирующие ситуации могут возникать из-за конкурирующих стратегий. Это часто происходит, когда мы пытаемся справиться с несколькими задачами одновременно. Для исследования таких ситуаций была разработана методика двойной задачи (см., например, Daneman, Carpenter, 1980; Engle, 2001). В ходе решения двойной задачи испытуемого просят выполнять два действия одновременно, например читать предложения и считать. Интерференция между целями двух задач приводит к возникновению дезориентирующего контекста, мешающего контролю за решением обеих задач (Cowan, Morey, 2007).

В отличие от дезориентирующих ситуаций, направляющие ситуации активируют преимущественно релевантные задаче схемы, которые нужны для ее решения (Pascual-Leone, Johnson, 1991, 2005, 2011). Направляющими являются те ситуации, в которых дистракторы отсутствуют или же таковы, что решатель уже умеет с легкостью преодолевать возникающее отвлечение. К примеру, саккадические задачи можно рассматривать как типичный пример направляющих ситуаций, используемых в психологических экспериментах. В инструкции к этой методике испытуемого просят перевести взгляд (то есть совершить саккаду) в направлении перцептивно заметной зрительной цели. В то же время для выполнения задачи с антисаккадами испытуемых напротив просят *удержаться* от этой устойчивой реакции, возникающей из-за автоматического ориентировочного рефлекса, и намеренно перевести взгляд в противоположном от появляющейся зрительной подсказки направлении (то есть когда зрительный стимул появляется справа, испытуемые должны посмотреть налево; Hallett, 1978). Ситуация антисаккадической задачи содержит сильный дезориентирующий компонент (автоматическую установку посмотреть на появившийся стимул), который необходимо намеренно преодолеть. И действительно, метаанализ данных нейровизуализационных исследований показывает, что, помимо лобных глазодвигательных областей (frontal eye fields), саккады регулируются теменной корой (Jamadar et al., 2013; в терминах теории конструктивных операторов это соответствует S-оператору). В то же время антисаккады требуют участия еще и префронтальной коры — отдела мозга, связанного со схемами *управляющего контроля*, регулирующими активацию и торможение внимания, то есть когнитивным контролем и умственным усилием (E-, M- и I-операторами в терминах ТКО).

Поскольку теория конструктивных операторов является общей теорией когнитивного развития, она может быть полезна в психологии, нейронауке и сфере образования. Некоторые исследователи предполагают, что подходы, в которых рассматриваются сложные когнитивные явления, могут предоставить ценный материал для вычислительных моделей и создания алгоритмов (Schmid et al., 2011). Теория конструктивных операторов — это модель, описывающая конкретные правила умственной работы (скрытые операторы)

и общие правила, которые использует любой человек, если он решает задачи и использует модели; это в том числе разработчики компьютерных технологий, программисты и пользователи. Методы ТКО, возможно, не помогут при поиске наилучшей программы для решения конкретной задачи или при реализации конкретной стратегии; однако они могут помочь определить сложность интеллектуальной работы по созданию стратегии выполнения задачи для проектируемой компьютерной программы (со стороны разработчика) или по ее пониманию (со стороны пользователя). Методы теории конструктивных операторов также могут способствовать нахождению эвристик для разработки программной стратегии при решении конкретной задачи (или для обучения). Понятия *дезориентирующих или направляющих ситуаций* и объясняющие их теоретические конструкции могут также способствовать разработке моделей, позволяющих различать программы по сложности (с обеих точек зрения — как разработчиков, так и пользователей). Более того, предполагаемые в рамках нашей теории ограничения по емкости ментального внимания (и в особенности понятие M-оператора) могут быть полезны при оценке сложности компьютерных программ для пользователей на различных стадиях разработки.

Исследования сложных психических явлений, таких как рекурсивное мышление (см., напр., van den Bos et al., 2016), также могут получить важный теоретический импульс при интерпретации этих феноменов в терминах теории конструктивных операторов. В частности, рекурсивное мышление является сложным видом человеческой деятельности, связанным с речью, математикой, решением задач, социальным познанием, моделью психического и так далее. В освоении или понимании любого сложного, разворачивающегося во времени процесса может быть задействована рекурсия. При этом важно отметить, что способность понимать психические состояния других и смотреть на ситуацию с разных точек зрения развивается на протяжении детства и подросткового периода (см. van den Bos et al., 2016; Im-Bolter et al., 2016). Ван ден Бос и коллеги (van den Bos et al., 2016) показали, что успешность в задачах на рекурсивное мышление увеличивается с возрастом. Такое улучшение может быть только частично объяснено за счет развития вербальных способностей, поскольку задачи на рекурсивное мышление задействуют также и невербальную обработку информации. К сходным выводам приходят и Им-Болтер с коллегами (Im-Bolter et al., 2016), обнаружившие, что успешность в задачах на рассуждения о представлениях другого человека в значительной степени зависят от уровня развития M- и I-операторов, как они определены в теории конструктивных операторов.

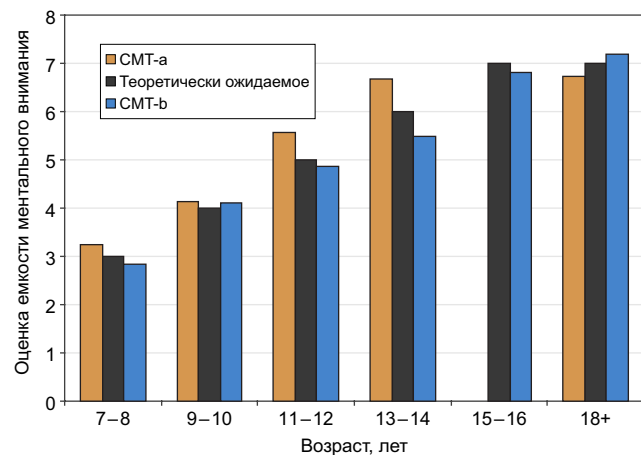
Напомним, что различие между направляющими и дезориентирующими ситуациями представляет собой континуальную шкалу (то есть ситуации могут быть в некоторой степени направляющими и в некоторой степени дезориентирующими), и оценка по данной шкале варьирует в зависимости от того, какие именно системные операторы должны быть задействованы для решения данной задачи. Таким образом, при равенстве других условий дезориентирующие ситуации

более требовательны к емкости  $E$ -,  $M$ - и  $I$ -операторов по сравнению с направляющими задачами. Как мы можем определить, будет ли задача направляющей или дезориентирующей? Чтобы обнаружить те признаки и процессы, от которых это зависит, необходимо произвести так называемый метасубъектный анализ задачи.

## Метасубъектный анализ задачи

Метасубъектный анализ задачи — это теоретически мотивированный подход к оценке требований к емкости  $M$ -оператора со стороны задачи. Как мы уже упоминали выше, он называется метасубъектным, потому что направлен на описание процесса решения «изнутри», то есть с точки зрения возможных для испытуемого процессов решения. Теория конструктивных операторов предлагает определенные конструкты и инструменты, с помощью которых можно разложить задачу на ее основные процессуальные компоненты (схемы и системные функции, то есть операторы и принципы), которые должны быть учтены при расчете требований к  $E$ -,  $M$ -,  $I$ - и другим операторам со стороны задачи (Pascual-Leone, Johnson, 1991, 2005, 2011, in press). Иными словами, этот метод анализа может быть использован, чтобы определить подходящую стратегию для решения конкретной задачи, смоделировать операциональные схемы (в том числе их параметры), фигуративные схемы, а также соответствующие им операторы, которые, вероятнее всего, внесут наибольший вклад в процесс решения. Данный метод особенно полезен при разработке новых измерительных методик для оценки индивидуальных различий, при работе с детьми разного возраста или в клинической диагностике. К примеру, если мы знаем, что некая задача требует координации одной операциональной и трех фигуративных схем, мы можем ожидать, что требования к емкости  $M$ -оператора со стороны данной задачи будут составлять максимум четыре единицы (если только в условия задачи не включены дополнительные усложняющие, отвлекающие или дезориентирующие факторы). Благодаря этому мы можем предсказать, что эта задача в норме будет легкой для взрослого ( $M$ -оператор у которого часто работает на уровне загруженности 4-5 единиц, но потенциально обладает емкостью 7 единиц; Pascual-Leone, 1970, 2012, 2019; Pascual-Leone, Johnson, 2005, 2011). А вот у детей младше девяти лет такая задача, вероятнее всего, вызовет сложности, если только не вмешаются какие-либо ситуативные факторы или прошлый опыт, облегчающие решение задачи.

Мы проиллюстрируем применение метода метасубъектного анализа задачи в контексте исследования когнитивного развития на материале задачи сравнения цветов (Color Matching Task, далее CMT; Arsalidou et al., 2010). Рассмотрим для примера вариант «Клоуны». В этой задаче испытуемым поочередно предъявляют серию рисунков (это всегда одна и та же фигура клоуна), и в отношении каждого из рисунков испытуемые должны ответить, совпадают ли определенные релевантные признаки (в данном варианте задачи — цвета) на текущем рисунке с теми, что были на пре-



**Рисунок 3.** Оценки емкости ментального внимания, полученные с помощью задачи на сравнение цветов (CMT). Черные столбцы — теоретически прогнозируемое значение емкости  $M$ -оператора на данном уровне развития по Pascual-Leone, 1970. Эмпирические оценки были получены в различных исследованиях (CMT-a: Arsalidou et al., 2010 и CMT-b: Powell et al., 2014)

дующем. Другими словами, испытуемые оценивают, изменились ли цвета при смене рисунков. Не имеет значения, какая именно часть рисунка закрашена в определенный цвет, важно только то, присутствует ли он хоть в какой-то части рисунка. На различных уровнях сложности задачи количество цветов в наборе варьируется от одного до шести. Таким образом, в этой задаче по отношению к релевантным цветам (фигуративные схемы) в количестве от одного до шести применяется одна операция (операциональная схема «Просматривать и опознавать»). Кроме того, в задаче сравнения цветов задаются стимулы, которые требуется игнорировать: это синий и зеленый цвета. Решателю также приходится игнорировать расположение цветов и саму фигуру клоуна, включая его лицо и одежду (перчатки, пуговицы, воротник и т. д.). Эти отвлекающие/дезориентирующие факторы имеют большое значение для оценки требований к емкости  $M$ -оператора со стороны задачи, поскольку они вынуждают решателя использовать дополнительные стратегии, чтобы избежать ошибок, что обычно предполагает увеличение числа используемых схем — а значит, и повышение требований к емкости  $M$ -оператора. В результате в рассматриваемой задаче операция «Просматривать–опознавать–сопоставлять» становится более сложной: требуется дополнительная схема, чтобы для сопоставления с набором из  $n$  релевантных цветов предыдущего рисунка поочередно выделять каждый релевантный цвет на текущей картинке с клоуном, где присутствуют еще и отвлекающие цвета. Таким образом, если мы хотим рассчитать требования к емкости  $M$ -оператора для обработки одного рисунка, на котором необходимо оценить  $n$  релевантных цветов, она будет составлять  $n+2$  схемы (где 2 единицы составляют операциональная схема «Просматривать–опознавать–сопоставлять» и схема выделения целевых цветов из общего рисунка клоуна). Например, требования к емкости  $M$ -оператора в задаче с 2 релевантными цветами будут составлять 4 единицы. Поскольку мы знаем,



что емкость ментального внимания у детей к 9–10 годам достигает 4 единиц (таблица 2), то мы можем ожидать, что данный уровень сложности задачи будет им доступен.

Как видно из рисунка 3, эмпирические результаты, полученные в двух срезовых исследованиях, продемонстрировали значительное соответствие между оценками емкости *M*-оператора, полученными по реальным результатам детей в задаче на сравнение цветов, и априорным теоретическим предсказанием, сделанным для различных возрастных групп (Arsalidou et al., 2010; Powell et al., 2014). Эти эмпирические результаты, наряду со многими другими, полученными в разных возрастных группах и на разных задачах и частично процитированными выше, свидетельствуют о высокой конструктивной валидности теоретических предсказаний модели, сформулированных более сорока лет назад (Arsalidou et al., 2010; Pascual-Leone, 1970; Pascual-Leone, Baillargeon, 1994; Pascual-Leone, Johnson, 2005, 2011). Сходство полученных количественных показателей для различных типов задач и различных возрастных групп также свидетельствует о надежности и конструктивной валидности используемого метода измерения емкости ментального внимания, который также примечательным образом культурно независим (Arsalidou, Im-Bolter, 2016; Miller et al., 1989; Miller et al., 1992; Pascual-Leone et al., 2000).

## Заключение

Таким образом, мы кратко описали основные конструкции, модели и количественные предсказания теории конструктивных операторов, а также проиллюстрировали ее примерами из исследований и обыденной жизни. Отталкиваясь от работ Ж. Пиаже и К. Гольдштейна (Goldstein, 1934/2000), а также от нейропсихологической теории, в том числе работ А. Р. Лурии, теория конструктивных операторов посредством конструктивистского подхода к когнитивному развитию вносит свой особый вклад в понимание взаимодействия между блоками мозга по А. Р. Лурии: первым блоком мозга, регулирующим тонус, уровни бодрствования и психические состояния, соответствующие возбуждению, бдительности и угнетению внимания, и третьим блоком программирования, регуляции и контроля (процессы планирования, реализации и контроля деятельности). Теория конструктивных операторов показывает, как именно происходит это взаимодействие, вводя необходимые для этого понятия схем и скрытых операторов, и в особенности — разрабатывая концепцию ментального внимания. *Ментальное внимание было описано (хотя и не получило объяснения) в работах У. Джемса и А. Р. Лурии как произвольное интеллектуальное внимание; в теории конструктивных операторов оно было количественно изучено в ходе его развития на многих возрастных группах.* Мы также проанализировали некоторые аспекты связи ментального внимания с сознанием и интеллектом.

Для нас важно подчеркнуть еще три ключевых преимущества, которыми располагает теория конструктивных операторов. Во-первых, вводятся различение

и координация между скрытыми системными операторами (конкретными правилами, полностью сводимыми к функциональной динамике мозга и регуляторным процессам) и схемами как носителями информации (нейронными ансамблями и нейронными сетями). Отметим, что независимость от содержания и регуляторные функции скрытых системных операторов позволяют применять эту концепцию при моделировании контекст-зависимых процессов использования схем в различных предметных областях. Это особенно важно, потому что ментальное внимание относится к числу когнитивных ресурсов, применимых в различных возрастах и при решении различных задач (Arsalidou, Im-Bolter, 2016; см. также обзор в Onwumere, Reid, 2014). Во-вторых, данная теория позволила получить количественные предсказания уровней емкости ментального внимания, характеризующих различные стадии когнитивного развития, предложенные в теории Ж. Пиаже и неопиажетианских подходах (первые такие предсказания были сделаны Х. Паскуалем-Леоне в 1970; Pascual-Leone, 1970). Эти оценки, в свою очередь, дают возможность, пользуясь методом метасубъектного анализа, количественно предсказывать успешность детей различных возрастов во множестве задач. Таким образом, эти предсказания могут быть проверены и уже проверялись эмпирически. В-третьих, теория конструктивных операторов предложила методологию априорного определения доступной на данном этапе развития сложности когнитивной задачи, или требований к необходимой для ее выполнения емкости *M*-оператора. Это позволяет строить строгие предсказания успешности в том или ином виде задач в зависимости от возраста.

## Литература

- Ackerman P.L. A theory of adult intellectual development: Process, personality, interests, and knowledge // *Intelligence*. 1996. Vol. 22. No. 2. P. 227–257. doi:10.1016/s0160-2896(96)90016-1
- Agostino A., Johnson J., Pascual-Leone J. Executive functions underlying multiplicative reasoning: Problem type matters // *Journal of Experimental Child Psychology*. 2010. Vol. 105. No. 4. P. 286–305. doi:10.1016/j.jecp.2009.09.006
- Anderson J.R., Bothell D., Lebiere C., Matessa M. An integrated theory of list memory // *Journal of Memory and Language*. 1998. Vol. 38. No. 4. P. 341–380. doi:10.1006/jmla.1997.2553
- Arsalidou M. Neural processes of visual problem solving and complexity. A Master's Thesis. York University, Toronto, ON, 2003.
- Arsalidou M. Working memory capacity: The need for process task-analysis // *Frontiers in Psychology*. 2013. Vol. 4. P. 257:1–2. doi:10.3389/fpsyg.2013.00257
- Arsalidou M., Im-Bolter N. Why parametric measures are critical for understanding typical and atypical cognitive development // *Brain Imaging and Behavior*. 2016. Vol. 11. No. 4. P. 1214–1224. doi:10.1007/s11682-016-9592-8
- Arsalidou M., Pascual-Leone J. Constructivist developmental theory is needed in developmental neuroscience // *npj Science of Learning*. 2016. Vol. 1. No. 1. doi:10.1038/npjscilearn.2016.16
- Arsalidou M., Pascual-Leone J., Johnson J. Misleading cues improve developmental assessment of working memory capacity: The color matching tasks // *Cognitive Development*. 2010. Vol. 25. No. 3. P. 262–277. doi:10.1016/j.cogdev.2010.07.001
- Arsalidou M., Pascual-Leone J., Johnson J., Morris D., Taylor M.J. A balancing act of the brain: Activations and deactivations driven by cognitive load // *Brain and Behavior*. 2013. Vol. 3. No. 3. P. 273–285. doi:10.1002/brb3.128



- Arsalidou M., Sharaev M. G., Kotova T., Martynova O. Commentary: Selective development of anticorrelated networks in the intrinsic functional organization of the human brain // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2017. Vol. 11. P.13:1–3. doi:10.3389/fnhum.2017.00013
- Baddeley A. The episodic buffer: A new component of working memory? // *Trends in Cognitive Sciences*. 2000. Vol. 4. No. 11. P. 417–423. doi:10.1016/s1364-6613(00)01538-2
- Bereiter C., Scardamalia M. Pascual-Leone's M Construct as a link between cognitive-developmental and psychometric concepts of intelligence // *Intelligence*. 1979. Vol. 3. No. 1. P. 41–63. doi:10.1016/0160-2896(79)80005-7
- Berthoz A. *Simplicity: Simplifying principles for a complex world* (G. Weiss, Trans.). New Haven: Yale University Press, 2012.
- Case R. The role of the frontal lobes in the regulation of cognitive development // *Brain and Cognition*. 1992. Vol. 20. No. 1. P. 51–73. doi:10.1016/0278-2626(92)90061-p
- Cowan N. Metatheory of storage capacity limits // *Behavioral and Brain Sciences*. 2001. Vol. 24. No. 1. P. 154–176. doi:10.1017/s0140525x0161392x
- Cowan N. *Working memory capacity* (Essays in cognitive psychology). New York: Psychology Press, 2005.
- Cowan N., Morey C. C. How can dual-task working memory retention limits be investigated? // *Psychological Science*. 2007. Vol. 18. No. 8. P. 686–688. doi:10.1111/j.1467-9280.2007.01960.x
- Cowan N., Ricker T. J., Clark K. M., Hinrichs G. A., Glass B. A. Knowledge cannot explain the developmental growth of working memory capacity // *Developmental Science*. 2015. Vol. 18. No. 1. P. 132–145. doi:10.1111/desc.12197
- Daneman M., Carpenter P. A. Individual differences in working memory and reading // *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*. 1980. Vol. 19. No. 4. P. 450–466. doi:10.1016/S0022-5371(80)90312-6
- Das J. P., Kirby J., Jarman R. F. Simultaneous and successive synthesis: An alternative model for cognitive abilities // *Psychological Bulletin*. 1975. Vol. 82. No. 1. P. 87–103. doi:10.1037/h0076163
- Demetriou A., Spanoudis G. *Growing minds: A developmental theory of intelligence, brain, and education*. N.Y.: Routledge, 2018.
- Edelman G. M. *Neural Darwinism. The theory of neural group selection*. New York: Basic Books, 1987.
- Engle R. W. What is working memory capacity? // *The nature of remembering: Essays in honor of Robert G. Crowder / H. L. Roediger, J. S. Nairne, I. Neath, A. M. Surprenant* (Eds.). Washington: American Psychological Association, 2001. P. 297–314. doi:10.1037/10394-016
- Ericsson K. A., Kintsch W. Long-term working memory // *Psychological Review*. 1995. Vol. 102. No. 2. P. 211–245. doi:10.1037/0033-295x.102.2.211
- Frings C., Schneider K. K., Fox E. The negative priming paradigm: An update and implications for selective attention // *Psychonomic Bulletin & Review*. 2015. Vol. 22. No. 6. P. 1577–1597. doi:10.3758/s13423-015-0841-4
- Gogtay N., Giedd J. N., Lusk L., Hayashi K. M., Greenstein D., Vaituzis A. C., Nugent T. F., Herman D. H., Clasen L. S., Toga A. W., Rapoport J. L., Thompson P. M. Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2004. Vol. 101. No. 21. P. 8174–8179. doi:10.1073/pnas.0402680101
- Goldstein K. *The organism*. New York, NY: Zone Books, 2000.
- Halford G. S., Cowan N., Andrews G. Separating cognitive capacity from knowledge: A new hypothesis // *Trends in Cognitive Sciences*. 2007. Vol. 11. No. 6. P. 236–242. doi:10.1016/j.tics.2007.04.001
- Halford G. S., Wilson W. H., Phillips S. Processing capacity defined by relational complexity: Implications for comparative, developmental, and cognitive psychology // *Behavioral and Brain Sciences*. 1998. Vol. 21. No. 6. P. 803–831. doi:10.1017/s0140525x98001769
- Hallett P. E. Primary and secondary saccades to goals defined by instructions // *Vision Research*. 1978. Vol. 18. No. 10. P. 1279–1296. doi:10.1016/0042-6989(78)90218-3
- Hendry A., Jones E. J. H., Charman T. Executive function in the first three years of life: Precursors, predictors and patterns // *Developmental Review*. 2016. Vol. 42. P. 1–33. doi:10.1016/j.dr.2016.06.005
- Hutchison K. A. Is semantic priming due to association strength or feature overlap? A microanalytic review // *Psychonomic Bulletin & Review*. 2003. Vol. 10. No. 4. P. 785–813. doi:10.3758/bf03196544
- Im-Bolter N., Agostino A., Owens-Jaffray K. Theory of mind in middle childhood and early adolescence: Different from before? // *Journal of Experimental Child Psychology*. 2016. Vol. 149. P. 98–115. doi:10.1016/j.jecp.2015.12.006
- Im-Bolter N., Johnson J., Pascual-Leone J. Processing limitations in children with specific language impairment: The role of executive function // *Child Development*. 2006. Vol. 77. No. 6. P. 1822–1841. doi:10.1111/j.1467-8624.2006.00976.x
- Jamadar S. D., Fielding J., Egan G. F. Quantitative meta-analysis of fMRI and PET studies reveals consistent activation in fronto-striatal-parietal regions and cerebellum during antisaccades and prosaccades // *Frontiers in Psychology*. 2013. Vol. 4. P. 749:1–15. doi:10.3389/fpsyg.2013.00749
- Johnson J., Im-Bolter N., Pascual-Leone J. Development of mental attention in gifted and mainstream children: The role of mental capacity, inhibition, and speed of processing // *Child Development*. 2003. Vol. 74. No. 6. P. 1594–1614. doi:10.1046/j.1467-8624.2003.00626.x
- Johnson M. H., Posner M. I., Rothbart M. K. Components of visual orienting in early infancy: Contingency learning, anticipatory looking, and disengaging // *Journal of Cognitive Neuroscience*. 1991. Vol. 3. No. 4. P. 335–344. doi:10.1162/jocn.1991.3.4.335
- Johnstone A. H., El-Banna H. Understanding learning difficulties — A predictive research model // *Studies in Higher Education*. 1989. Vol. 14. No. 2. P. 159–168. doi:10.1080/03075078912331377486
- Kastner S., Ungerleider L. G. Mechanisms of visual attention in the human cortex // *Annual Review of Neuroscience*. 2000. Vol. 23. No. 1. P. 315–341. doi:10.1146/annurev.neuro.23.1.315
- Lawson A. E. Predicting science achievement: The role of developmental level, disembedding ability, mental capacity, prior knowledge, and beliefs // *Journal of Research in Science Teaching*. 1983. Vol. 20. No. 2. P. 117–129. doi:10.1002/tea.3660200204
- Luria A. R. The functional organization of the brain // *Scientific American*. 1970. Vol. 222. No. 3. P. 66–79.
- Luria A. R. *The working brain. An introduction to neuropsychology*. London: Penguin Books, 1973.
- Luria A. R. Disturbances of higher cortical functions with lesions of the frontal region // *Higher cortical functions in man* Boston, MA: Springer US, 1980. P. 246–365. doi:10.1007/978-1-4615-8579-4\_8
- MacLeod C. M. Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review // *Psychological Bulletin*. 1991. Vol. 109. No. 2. P. 163–203. doi:10.1037/0033-2909.109.2.163
- McFarland D. J., Sibly R. M. The behavioural final common path // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 1975. Vol. 270. No. 907. P. 265–293. doi:10.1098/rstb.1975.0009
- Miller R. *Vygotsky in perspective*. Cambridge University Press, 2011.
- Miller R., Pascual-Leone J., Andrew D. J. Cognitive executive processes and mental capacity on the compound stimulus visual information task in a group of Zulu-speaking children // *South African Journal of Psychology*. 1992. Vol. 22. No. 1. P. 1–9. doi:10.1177/008124639202200101
- Miller R., Pascual-Leone J., Campbell C., Jukes T. Cross-cultural similarities and differences on two neo-Piagetian cognitive tasks // *International Journal of Psychology*. 1989. Vol. 24. No. 1–5. P. 293–313. doi:10.1080/00207594.1989.10600049
- Morgane P., Galler J., Mokler D. A review of systems and networks of the limbic forebrain/limbic midbrain // *Progress in Neurobiology*. 2005. Vol. 75. No. 2. P. 143–160. doi:10.1016/j.pneurobio.2005.01.001
- Morra S. On the information-processing demands of spatial reasoning // *Thinking & Reasoning*. 2001. Vol. 7. No. 4. P. 347–365. doi:10.1080/13546780143000116

Morra S., Camba R., Calvini G., Bracco F. Italians do it better? M-capacity measurement and cross-linguistic differences in the Direction Following Task (DFT) // *Journal of Applied Psycholinguistics*. 2013. Vol. 13. No. 1. P. 9–24.

Morra S., Parrella I., Camba R. The role of working memory in the development of emotion comprehension // *British Journal of Developmental Psychology*. 2011. Vol. 29. No. 4. P. 744–764. doi:10.1348/2044-835x.002006

Onwumere O., Reid N. Field dependency and performance in mathematics // *European Journal of Educational Research*. 2014. Vol. 3. No. 1. P. 43–57. doi:10.12973/eu-jer.3.1.43

Pascual-Leone J. Cognitive development and cognitive style: A general psychological integration. Unpublished doctoral dissertation. PhD dissertation. University of Geneva, Switzerland, 1969.

Pascual-Leone J. A mathematical model for the transition rule in Piaget's developmental stages // *Acta Psychologica*. 1970. Vol. 32. P. 301–345. doi:10.1016/0001-6918(70)90108-3

Pascual-Leone J. Constructive problems for constructive theories: The current relevance of Piaget's work and a critique of information-processing simulation psychology // *Developmental models of thinking* / R. H. Kluwe, H. Spada (Eds.). New York: Academic Press, 1980. P. 263–296.

Pascual-Leone J. Organismic processes for neo-Piagetian theories: A dialectical causal account of cognitive development // *International Journal of Psychology*. 1987. Vol. 22. No. 5–6. P. 531–570. doi:10.1080/00207598708246795

Pascual-Leone J. An organismic process model of Witkin's field-dependence—independence // *Cognitive style and cognitive development* Westport, CT, US: Ablex Publishing, 1989. P. 36–70.

Pascual-Leone J. Learning and development as dialectical factors in cognitive growth // *Human Development*. 1995. Vol. 38. No. 6. P. 338–348. doi:10.1159/000278340

Pascual-Leone J. Vygotsky, Piaget, and the problem of Plato // *Swiss Journal of Psychology / Schweizerische Zeitschrift für Psychologie / Revue Suisse de Psychologie*. 1996. Vol. 55. No. 2–3. P. 84–92.

Pascual-Leone J. Reflections on working memory: Are the two models complementary? // *Journal of Experimental Child Psychology*. 2000. Vol. 77. No. 2. P. 138–154. doi:10.1006/jecp.2000.2593

Pascual-Leone J. Mental attention, not language, may explain evolutionary growth of human intelligence and brain size // *Behavioral and Brain Sciences*. 2006. Vol. 29. No. 1. P. 19–20. doi:10.1017/s0140525x06299011

Pascual-Leone J. Piaget as a pioneer of dialectical constructivism: Seeking dynamic processes for human science // *After Piaget* / E. Marti, C. Rodriguez (Eds.). New Jersey: Transaction Publishers, 2012. P. 15–41.

Pascual-Leone J. Can we model organismic causes of working memory, efficiency and fluid intelligence? A meta-subjective perspective // *Intelligence*. 2013. Vol. 41. No. 5. P. 738–743. doi:10.1016/j.intell.2013.06.001

Pascual-Leone J. Dialectics // *Encyclopedia of critical psychology* / T. Teo (Ed.). Springer New York, 2014. P. 421–428.

Pascual-Leone J. Growing minds have a maturing mental attention: A review of Demetriou and Spanoudis (2018) // *Intelligence*. 2019. Vol. 72. P. 59–66. doi:10.1016/j.intell.2018.12.001

Pascual-Leone J., Baillargeon R. Developmental measurement of mental attention // *International Journal of Behavioral Development*. 1994. Vol. 17. No. 1. P. 161–200. doi:10.1177/016502549401700110

Pascual-Leone J., Escobar E. M. R., Johnson J. Logic: Development of logical operations // *Encyclopedia of human behavior* New York, NY: Elsevier, 2012. P. 538–549. doi:10.1016/b978-0-12-375000-6.00223-8

Pascual-Leone J., Goodman D. Intelligence and experience: A neopiagetian approach // *Instructional Science*. 1979. Vol. 8. No. 4. P. 301–367.

Pascual-Leone J., Goodman D., Ammon P., Subelman I. Piagetian theory and neo-Piagetian analysis as psychological guides in education // *Knowledge and development* New York: Plenum Press, 1978. P. 243–289. doi:10.1007/978-1-4684-3402-6\_8

Pascual-Leone J., Johnson J. The psychological unit and its role in task analysis: A reinterpretation of object performance // *Criteria for competence: Controversies in the conceptualization and assessment of children's abilities* / M. Chandler, M. Chapman (Eds.). Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1991. P. 153–187. doi:10.4324/9780203772102

Pascual-Leone J., Johnson J. A dialectical constructivist view of representation: Role of mental attention, executives, and symbols // *Development of mental representation: Theories and applications* / I. E. Sigel (Ed.). Mahwah, NJ: Erlbaum, 1999. P. 169–200.

Pascual-Leone J., Johnson J. A dialectical constructivist view of developmental intelligence // *Handbook of understanding and measuring intelligence* Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Inc., 2005. P. 177–201. doi:10.4135/9781452233529.n11

Pascual-Leone J., Johnson J. A developmental theory of mental attention: Its application to measurement and task analysis // *Cognitive development and working memory: A dialogue between neo-Piagetian theories and cognitive approaches* New York, NY: Psychology Press, 2011. P. 13–46.

Pascual-Leone J., Johnson J. Organismic-causal models “from within” clarify developmental change and stages // *New perspectives on human development* / N. Budwig, E. Turiel, P. D. Zelazo (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2017. P. 67–87. doi:10.1017/cbo9781316282755.006

Pascual-Leone J., Johnson J. M. The working mind: Meaning and mental attention in human development. Cambridge, Mass.: MIT Press, in press.

Pascual-Leone J., Johnson J., Baskind S., Dworsky S., Severtston E. Culture-fair assessment and the processes of mental attention // *Experience of mediated learning: An impact of Feuerstein's theory in education and psychology* / A. Kozulin, Y. Rand (Eds.). New York, NY: Pergamon, 2000. P. 191–214.

Pascual-Leone J., Pascual-Leone A., Arsalidou M. Neuropsychology still needs to model organismic processes “from within” // *Behavioral and Brain Sciences*. 2015. Vol. 38. P. e83:33–35. doi:10.1017/s0140525x14000983

Pennings A. H., Hessels M. G. P. The Measurement of mental attentional capacity: A neo-piagetian developmental study // *Intelligence*. 1996. Vol. 23. No. 1. P. 59–78. doi:10.1016/s0160-2896(96)80006-7

Powell T. L., Arsalidou M., Vogan V. M., Taylor M. J. Letter and colour matching tasks: Parametric measures of developmental working memory capacity // *Child Development Research*. 2014. Vol. 2014. P. 961781:1–9. doi:10.1155/2014/961781

Rakic P. Evolution of the neocortex: A perspective from developmental biology // *Nature Reviews Neuroscience*. 2009. Vol. 10. No. 10. P. 724–735. doi:10.1038/nrn2719

Rock I. The logic of perception. Cambridge: MIT Press, 1983.

Schmid U., Ragni M., Gonzalez C., Funke J. The challenge of complexity for cognitive systems // *Cognitive Systems Research*. 2011. Vol. 12. No. 3–4. P. 211–218. doi:10.1016/j.cogsys.2010.12.007

Sharaev M. G., Zavyalova V. V., Ushakov V. L., Kartashov S. I., Velichkovsky B. M. Effective connectivity within the default mode network: Dynamic causal modeling of resting-state fMRI data // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2016. Vol. 10. P. 14:1–10. doi:10.3389/fnhum.2016.00014

Sherrington C. S. The integrative action of the nervous system. New Haven, CT: Yale University Press, 1906. doi:10.1037/13798-000

Sherrington C. S. Man on his nature. London, Great Britain: Cambridge University Press, 1940. doi:10.1017/cbo9780511694196

Shipstead Z., Harrison T. L., Engle R. W. Working memory capacity and fluid intelligence: Maintenance and disengagement // *Perspectives on Psychological Science*. 2016. Vol. 11. No. 6. P. 771–799. doi:10.1177/17456916166650647

Simmering V. R., Perone S. Working memory capacity as a dynamic process // *Frontiers in Psychology*. 2013. Vol. 3. P. e567. doi:10.3389/fpsyg.2012.00567

Stroop J. R. Studies of interference in serial verbal reactions // *Journal of Experimental Psychology*. 1935. Vol. 18. No. 6. P. 643–662. doi:10.1037/h0054651

*Ungerleider L. G., Haxby J. V.* “What” and “where” in the human brain // *Current Opinion in Neurobiology*. 1994. Vol. 4. No. 2. P. 157–165. [doi:10.1016/0959-4388\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0959-4388(94)90066-3)

*van den Bos E., de Rooij M., Sumter S. R., Westenberg P. M.* Continued development of recursive thinking in adolescence: Longitudinal analyses with a revised recursive thinking test // *Cognitive Development*. 2016. Vol. 37. P. 28–41. [doi:10.1016/j.cogdev.2015.11.002](https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2015.11.002)

*Witkin H. A.* The nature and importance of individual differences in perception // *Journal of Personality*. 1949. Vol. 18. No. 2. P. 145–170. [doi:10.1111/j.1467-6494.1949.tb01237.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-6494.1949.tb01237.x)

*Witkin H. A.* Individual differences in ease of perception of embedded figures // *Journal of Personality*. 1950. Vol. 19. No. 1. P. 1–15. [doi:10.1111/j.1467-6494.1950.tb01084.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-6494.1950.tb01084.x)

*Witkin H. A., Goodenough D. R.* Cognitive styles: Essence and origins. Field dependence and field independence. *Psychological Issues, Monograph 51*. N.Y.: International Universities Press, 1981.